

# Exposición laboral a nanomateriales en el ámbito de la investigación: aplicación de la metodología cualitativa CB Nanotool para la evaluación del riesgo

**Tania Berlana Llorente**

Ministerio de Industria, Energía y Turismo

**Mercedes Colorado Soriano, Virginia Gálvez Pérez y María Encarnación Sousa Rodríguez**

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. INSHT

*En la actualidad son numerosos los proyectos de investigación relacionados con la nanotecnología. Debido al auge en esta materia, los investigadores son un colectivo que presenta riesgo de exposición a nanomateriales. La falta de información toxicológica para muchos de estos nanomateriales complica la evaluación de riesgos, por eso se proponen una serie de métodos cualitativos que pueden ayudar a establecer medidas preventivas y a proteger la seguridad y salud de los trabajadores en el contexto actual de incertidumbre.*

## INTRODUCCIÓN

La incorporación de nanomateriales a productos presentes en nuestra vida cotidiana es cada vez mayor debido a la mejora de propiedades que aportan a los productos finales. Esto hace que el número de trabajadores expuestos vaya en aumento siendo actualmente una prioridad el control de los riesgos derivados de la exposición laboral a nanomateriales. Así lo señala la Estrategia Española de Seguridad y Salud en el Trabajo 2015-2020, en la que se establece

la necesidad de promover la investigación, seguir los avances realizados por grupos de investigadores de nuestro entorno, detectar colectivos y actividades expuestas a estos riesgos y establecer programas reglados de vigilancia de los trabajadores expuestos (1).

Actualmente se están realizando esfuerzos en esta línea, con el objetivo de obtener datos sobre exposiciones reales a nanomateriales, el establecimiento de estrategias de medición y estudios toxicológicos que aporten más datos para

poder establecer los efectos asociados a la exposición a nanomateriales. Sin embargo, aún se está lejos de poder realizar una evaluación de riesgos cuantitativa adecuada de acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 374/2001 sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo y la Guía Técnica correspondiente.

Los métodos cualitativos son, a fecha de hoy, una herramienta que puede ayudar a las empresas e instituciones que en



Fotografía 1. Proceso mecánico de molienda y tamizado de nanopartículas en vitrina de gases.

la actualidad emplean nanomateriales a controlar el riesgo que supone la exposición de sus trabajadores a los mismos y así garantizar una adecuada protección de su seguridad y salud. La aplicación de los métodos cualitativos también tiene sus limitaciones, muchas veces asociadas a la falta de información sobre el nanomaterial. Ante la falta de conocimiento y velando por asegurar la protección de los trabajadores se deberá aplicar el principio de precaución, resultando en algunos casos una sobreprotección.

## CONTROL BANDING NANOTOOL

Uno de los métodos cualitativos que se está empleando en la actualidad es el *Control Banding Nanotool* (CB Nanotool), desarrollado por Paik *et al.* en 2008, y que está basado en una matriz de decisiones similar a la propuesta por el *COSHH Essentials*. Este método fue diseñado para aplicarlo a procesos en los que se manejan pequeñas cantidades de nanomateriales, por ejemplo, en trabajos de laboratorio o producción a pequeña escala.

El método calcula una puntuación para la severidad y otra para la probabilidad a partir de distintos parámetros.

■ **Tabla 1** ■ **Cálculo de la puntuación de severidad.**

NANOMATERIAL				
	BAJA	MEDIA	DESCONOCIDA	ALTA
Química superficial; reactividad y capacidad de inducir radicales libres	0	5	7,5	10
Forma	0 Esférica o compacta	5 Irregular	7,5	10 Fibrosa o tubular
Diámetro	0 De 41 a 100 nm	5 De 11 a 40 nm	7,5	10 De 1 a 10 nm
Solubilidad		5 Soluble	7,5	10 Insoluble
Carcinogenicidad	0 no		4,5	6 sí
Toxicidad para la reproducción	0 no		4,5	6 sí
Mutagenicidad	0 no		4,5	6 sí
Toxicidad dérmica	0 no		4,5	6 sí
Capacidad de producir asma	0 no		4,5	6 sí
MATERIAL PADRE				
	BAJA	MEDIA	DESCONOCIDA	ALTA
Toxicidad (1)	2,5 0,101-1 mg/ m <sup>3</sup>	5 0,01-0,1 mg/ m <sup>3</sup>	7,5	10 <0,01 mg/ m <sup>3</sup>
Carcinogenicidad	0 no		3	4 sí
Toxicidad para la reproducción	0 no		3	4 sí
Mutagenicidad	0 no		3	4 sí
Toxicidad dérmica	0 no		3	4 sí
Capacidad de producir asma	0 no		3	4 sí

(1) La puntuación es cero cuando el VLA-ED® > 1 mg/m<sup>3</sup>.

La puntuación de severidad se calcula considerando 15 factores basados en las propiedades físico-químicas del nanomaterial (química superficial, forma y diámetro de la partícula y solubilidad), propiedades toxicológicas del nanomaterial y del material padre (carcinogenicidad, toxicidad para la reproducción, mutagenicidad, toxicidad dérmica y capacidad de producir asma) y para el material padre considera también la toxicidad basada en

el valor límite de exposición. La puntuación de la probabilidad se calcula a partir de los siguientes factores: cantidad estimada de nanomaterial durante la tarea, pulverulencia o capacidad para formar nieblas, número de trabajadores con exposición similar, frecuencia y duración de la operación. En las tablas 1 y 2 se detallan las puntuaciones de las variables que utiliza el método para determinar el nivel de riesgo.

**Tabla 2** ■ Cálculo de la puntuación de probabilidad.

	BAJA	MEDIA	DESCONOCIDA	ALTA
Cantidad estimada del nanomaterial durante la tarea	6,25 0- 10 mg	12,5 11 -100 mg	18,75	25 Mayor de 100 mg
Pulverulencia/capacidad de formar nieblas	7,5	15	22,5	30
Nº de trabajadores con exposición similar (1)	5 6-10	10 11-15	11,25	15 >15
Frecuencia de la operación (2)	5 mensual	10 semanal	11,25	15 diaria
Duración de la operación (3)	5 30-60 min	10 1-4 horas	11,25	15 >4 horas

(1) Para menos de 5 trabajadores la puntuación es cero.

(2) Para una frecuencia menor que mensual la puntuación es cero.

(3) Para una duración inferior a 30 minutos la puntuación es cero.

**Tabla 3** ■ Determinación del nivel de riesgo en función de la severidad y la probabilidad.

		PROBABILIDAD			
		EXTREMADAMENTE IMPROBABLE (0-25)	POCO PROBABLE (26-50)	PROBABLE (51-75)	MUY PROBABLE (76-100)
SEVERIDAD	MUY ALTA (76-100)	RL3	RL3	RL4	RL4
	ALTA (51-75)	RL2	RL2	RL3	RL4
	MEDIA (26-50)	RL1	RL1	RL2	RL3
	BAJA (0-25)	RL1	RL1	RL1	RL2

**Tabla 4** ■ Asociación de medidas preventivas según el nivel de riesgo obtenido.

NIVEL DE RIESGO	MEDIDA PREVENTIVA
NIVEL DE RIESGO 1	VENTILACIÓN GENERAL
NIVEL DE RIESGO 2	EXTRACCIÓN LOCALIZADA
NIVEL DE RIESGO 3	CONFINAMIENTO
NIVEL DE RIESGO 4	SOLICITAR ASESORAMIENTO EXTERNO

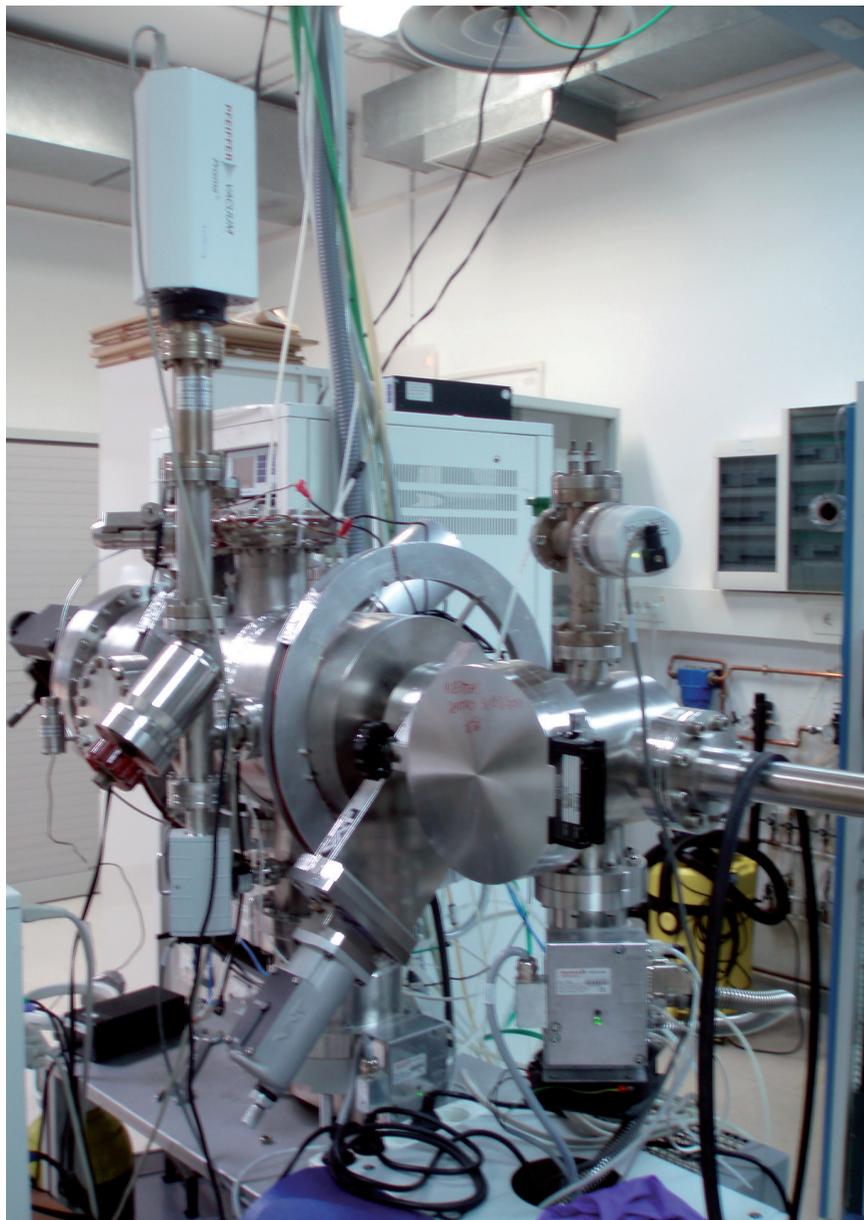
El método aporta una matriz de riesgo (ver tabla 3), en la que, combinando las puntuaciones de severidad y probabilidad, se obtiene un nivel de riesgo que va desde el nivel 1, asociado a un riesgo más leve, hasta el nivel 4 asociado a un nivel de riesgo más alto. Para cada nivel de riesgo se indica una medida preventiva (ver tabla 4) (2,3).

El método se puede consultar con más detalle en la página web [www.controlbanding.net](http://www.controlbanding.net), en donde también está disponible una aplicación en Excel para realizar los cálculos, y en la Nota Técnica de Prevención 877.

## EXPOSICIÓN LABORAL A NANOMATERIALES EN EL ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

Entre los entornos de trabajo con una mayor exposición a nanomateriales cabe destacar el ámbito de la investigación, debido al creciente número de proyectos que se han ido desarrollando en los últimos años relacionados con la nanotecnología. Este auge se ha visto favorecido por la creación en el año 2000 de la red Nanospain y la acción estratégica de Nanociencia y Nanotecnología en los Planes Nacionales de I+D+i de los años 2004-2007, 2008 y 2011, lo que supuso un fuerte incremento de grupos de investigación a nivel nacional trabajando con nanomateriales.

De hecho el desarrollo de la nanotecnología se ha abordado en todas las áreas científicas, desde la biología y la biomedicina, hasta las tecnologías físicas y de materiales, pasando por otras áreas a priori menos relacionadas pero en las que también los nanomateriales han tenido un fuerte impacto, como los recursos naturales y las ciencias de los alimentos. Hoy en día, gracias a la investigación básica desarrollada en múl-



Fotografía 2. Deposición de nanopartículas en cámara de ultra-alto-vacío.

tiples áreas de investigación, la nanotecnología está presente en diversidad de sectores.

### EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A NANOMATERIALES EN EL ÁMBITO DE LA INVESTIGACIÓN

Ante este creciente empuje de la nanotecnología en los centros de investigación, los Servicios de Prevención del

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), conocedores de los efectos que la exposición a nanomateriales puede tener en la seguridad y salud de los trabajadores, han llevado a cabo evaluaciones específicas del riesgo por exposición a nanomateriales.

Actualmente no se dispone de normativa específica para los nanomateriales que determine los aspectos que han de considerarse para caracterizar las exposiciones. Con el objetivo de ve-

lar por la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a nanomateriales, organismos como la Comisión Europea, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo y sus homólogos europeos, han elaborado documentos en donde se dan pautas de cara a la evaluación de riesgos (4,5). Para ello se proponen tanto los métodos de tipo cualitativo como los cuantitativos.

La metodología cualitativa aplicada para la evaluación del riesgo por exposición a nanomateriales en los laboratorios del CSIC es la CB Nanotool, expuesta anteriormente. Esta metodología permite obtener una primera conclusión sobre la necesidad de adoptar medidas preventivas adicionales a las que ya se han implantado en un determinado proceso de trabajo.

### IDENTIFICACIÓN DEL RIESGO POR EXPOSICIÓN A NANOMATERIALES

Uno de los puntos más importantes para la evaluación es la identificación de los factores que contribuyen a determinar la magnitud del riesgo. Por ello, y con el fin de establecer unos criterios homogéneos, que permitan además realizar análisis comparativos posteriores entre distintas exposiciones laborales, en el proceso de identificación se ha empleado una tabla de recogida de datos en la que se consideran unas condiciones concretas del puesto de trabajo.

Los campos registrados en la fase de recogida de datos coinciden con aquellos que es necesario analizar en el método de evaluación propuesto (CB Nanotool) que, al igual que en otras metodologías cualitativas de evaluación del riesgo, incluye aspectos relacionados con el agente mate-

**Tabla 5** ■ **Recogida de información y cálculo de las puntuaciones de probabilidad y severidad para el ejemplo de molienda.**

Factores relativos al nanomaterial y al material padre		Puntuación de severidad
Química superficial (nanomaterial)	Desconocido	7,5
Morfología (nanomaterial)	Esférica	0
Diámetro (nanomaterial)	50 nm	0
Solubilidad (nanomaterial)	Desconocido	7,5
Carcinogenicidad (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Toxicidad para la reproducción (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Mutagenicidad (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Toxicidad dérmica (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Capacidad de producir asma (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Toxicidad (material padre)	Sin Valor Límite Ambiental (VLA)	7,5
Carcinogenicidad (material padre)	No	0
Toxicidad para la reproducción (material padre)	No	0
Mutagenicidad (material padre)	No	0
Toxicidad dérmica (material padre)	No	0
Capacidad de producir asma (material padre)	No	0
		<b>Total: 45</b>
Variables relacionadas con la tarea		Puntuación probabilidad
Breve descripción del proceso (especificando las medidas de protección colectiva e individuales)	Molienda de nitruro de silicio hasta un tamaño de 50 nm obteniendo una cantidad neta de 100 mg mediante un mortero de ágata en vitrina de gases con la guillotina en la posición más baja posible (ver fotografía 1)	
Nombre del nanomaterial	Nitruro de silicio	
Cantidad estimada de nanomaterial durante el desarrollo de la tarea	100 mg	12,5
Pulverulencia / capacidad de formar nieblas	Desconocido	22,5
Número de trabajadores expuestos	3	0
Frecuencia de las operaciones	Semanal	10
Duración de la operación	2 horas	10
		<b>Total: 55</b>

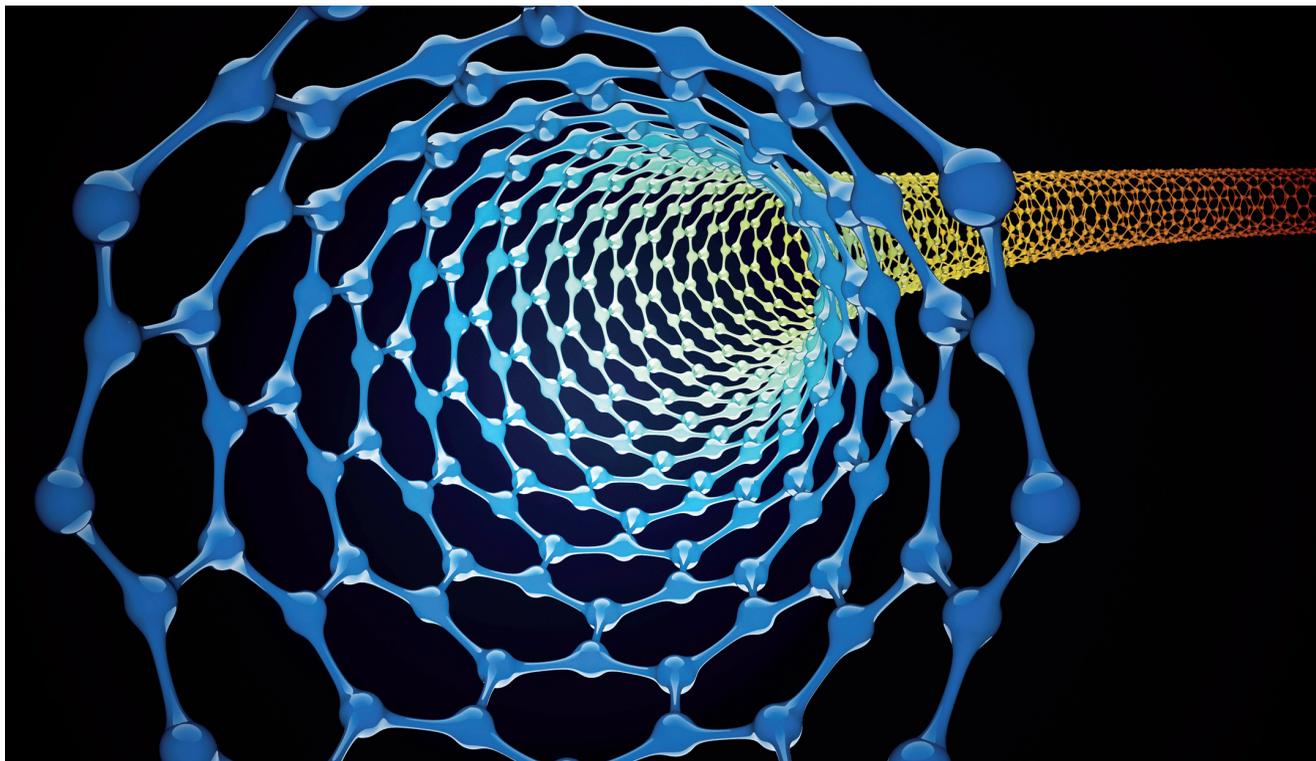
rial (nanomaterial y material padre) y variables asociadas a la tarea (frecuencia y duración de la exposición, etc.):

Factores relativos al nanomaterial o del material padre:

- Química superficial (nanomaterial)
- Morfología (nanomaterial)
- Diámetro (nanomaterial)
- Solubilidad (nanomaterial)
- Toxicidad (material padre)
- Carcinogenicidad (nanomaterial/material padre)
- Toxicidad para la reproducción (nanomaterial/material padre)
- Mutagenicidad (nanomaterial/material padre)
- Toxicidad dérmica (nanomaterial/material padre)
- Capacidad de producir asma (nanomaterial/material padre)

Variables relacionadas con la tarea:

- Breve descripción del proceso (especificando las medidas de protección colectiva e individuales)
- Nombre del nanomaterial
- Cantidad estimada de nanomaterial durante el desarrollo de la tarea
- Pulverulencia/capacidad de formar nieblas
- Número de trabajadores expuestos



- Frecuencia de las operaciones
- Duración de la operación

## EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A NANOMATERIALES

### Ejemplo 1: Molienda de nitruro de silicio hasta 50 nm en un mortero en vitrina de gases.

Esta técnica se utiliza en proyectos de tecnologías de materiales cuyo objetivo es investigar el cambio de las propiedades físico-químicas de estos (conductividad térmica o eléctrica, puntos de fusión o ebullición, etc.) cuando se incorporan nanomateriales en su composición. Para ello se parte de un elemento o compuesto sólido conocido que es sometido a diferentes procesos mecánicos (trituration y molienda, entre otros) hasta conseguir partículas de tamaño nanométrico, y finalmente se hace pasar por un tamiz para separar las partículas obtenidas según su tamaño (ver fotografía 1). Estos

procesos se llevan a cabo en vitrina de gases para evitar que las nanopartículas generadas se dispersen al ambiente de trabajo. Tras el proceso mecánico, los nanomateriales obtenidos se incorporan a la sustancia cuyo comportamiento físico-químico se va a estudiar mediante diferentes técnicas, de manera que el producto resultante es una nueva mezcla con nanomateriales incorporados en su interior.

En esta técnica, el proceso que conlleva un mayor riesgo de exposición a nanomateriales es el proceso mecánico de generación de nanomateriales. Por ello, se ha aplicado la metodología CB Nanotool de evaluación a la fase de molienda, en particular, de nitruro de silicio con un tamaño de 50 nm hasta una cantidad neta de 100 mg, tarea que se realiza todas las semanas durante un tiempo aproximado de 2 horas.

En la tabla 5 se expone toda la información correspondiente a este proceso mecánico de molienda y las puntuaciones asociadas a los factores considerados en la evaluación.

De la aplicación del método CB Nanotool a la actividad de generación de nanopartículas mediante el proceso mecánico de molienda de la citada sustancia, que en tamaño convencional no presenta características de toxicidad, se obtiene una puntuación de severidad de 45 (media) y de probabilidad de 55 (probable). Al introducir los datos en la matriz de decisión el resultado es que el desarrollo de la técnica tiene un nivel de riesgo 2 y precisa del uso de ventilación por extracción localizada o campanas de extracción durante la ejecución de los trabajos.

### Ejemplo 2: Proceso de fabricación de estructuras de pequeño tamaño en el que se insertan nanopartículas de arsénico de 5 nm sobre placas de silicio en equipos de ultra-alto-vacío.

Esta técnica se utiliza para producir obleas de silicio dopadas con elementos semiconductores con el fin de aumentar la conductividad eléctrica del material. El

**Tabla 6** Recogida de información y cálculo de las puntuaciones de probabilidad y severidad para el ejemplo de fabricación de obleas de silicio dopadas con nanopartículas.

Factores relativos al nanomaterial y al material padre		Puntuación de severidad
Química superficial (nanomaterial)	Desconocido	7,5
Morfología (nanomaterial)	Esférica	0
Diámetro (nanomaterial)	5 nm	10
Solubilidad (nanomaterial)	Desconocido	7,5
Carcinogenicidad (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Toxicidad para la reproducción (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Mutagenicidad (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Toxicidad dérmica (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Capacidad de producir asma (nanomaterial)	Desconocido	4,5
Toxicidad (material padre)	VLA-ED®=0,01 mg/m <sup>3</sup>	5
Carcinogenicidad (material padre)	Sí	4
Toxicidad para la reproducción (material padre)	No	0
Mutagenicidad (material padre)	No	0
Toxicidad dérmica (material padre)	No	0
Capacidad de producir asma (material padre)	No	0
		<b>Total: 56,5</b>
Variables relacionadas con la tarea		Puntuación probabilidad
Breve descripción del proceso (especificando las medidas de protección colectiva e individuales)	Fabricación de obleas de silicio dopadas con nanopartículas de arsénico de 5 nm de tamaño en el interior de cámaras de ultra-alto-vacío	
Nombre del nanomaterial	Arsénico	
Cantidad estimada de nanomaterial durante el desarrollo de la tarea	15 mg	12,5
Pulverulencia/capacidad de formar nieblas	Desconocido	22,5
Número de trabajadores expuestos	2	0
Frecuencia de las operaciones	Semanal	10
Duración de la operación	3 horas	10
		<b>Total: 55</b>

proceso se lleva a cabo en el interior de una cámara de acero en condiciones de ultra-alto-vacío (del orden de  $10^{-7}$  pascales) en el que se encuentra la oblea sobre la que previamente se ha dibujado mediante fotolitografía la zona en la que se van a depositar las nanopartículas de arsénico. Una vez introducida la sustancia con la que se va a dopar en el interior de la cámara, se procede a generar unas nanopartículas que son dirigidas hacia la zona de deposición mediante un campo electromagnético en el rango de las radiofrecuencias (ver fotografía 2).

En este proceso el operario lleva a cabo tareas de control y puesta en funcionamiento del equipo, de manera que no existe una manipulación directa de los nanomateriales al encontrarse estos confinados en una cámara de ultra-alto-vacío.

En la tabla 6 se expone toda la información correspondiente a este proceso de fabricación y las puntuaciones asociadas a los factores considerados en la evaluación.

De la aplicación del método CB Nanotool al proceso de fabricación de obleas de silicio dopadas con nanopartículas de arsénico en el interior de una cámara se obtiene una puntuación de severidad de 56,5 (alta) y de probabilidad de 55 (probable). Al introducir los datos en la matriz de decisión el resultado es que la técnica tiene un nivel de riesgo 3 y debe llevarse a cabo necesariamente en un proceso cerrado o sistema de contención, como las cámaras de ultra-alto-vacío empleadas.

## CONCLUSIONES

Ante la ausencia de normativa específica relativa a la exposición a nanomateriales, en el sector de la investigación se están aplicando metodologías cualitativas para la evaluación del riesgo en consonancia con lo propuesto por organismos

de reconocido prestigio en la materia, las cuales se basan en la consideración de la severidad y la probabilidad.

De la aplicación de estos métodos cualitativos a dos casos concretos se observa que, cuando la peligrosidad del nanomaterial es desconocida, lo que determina en gran medida la puntuación de severidad es la morfología y el tamaño del nanomaterial así como las propiedades toxicológicas del material padre.

La información toxicológica disponible para determinar la puntuación de la severidad es en muchos casos limitada; esta ausencia de datos se penaliza y por eso es importante revisar periódicamente y actualizar la información con los nuevos estudios que se vayan publicando. La aparición de nueva información podría cambiar la ponderación de puntuaciones e incluso podría llegar a cambiar los resultados obtenidos con la matriz de decisiones del CB Nanotool.

Independientemente de sus limitaciones, las metodologías cualitativas

nos permiten tomar decisiones sobre las medidas preventivas necesarias para el control del riesgo por exposición a nanomateriales.

En los dos procesos estudiados las medidas de control que se obtienen como resultado de la aplicación del método CB Nanotool coinciden con las ya existentes en los puestos de trabajo. No obstante, se recomienda en cualquier caso comprobar la eficacia de dichas medidas para asegurarse de que protegen frente a exposiciones de nanopartículas. El control de la exposición se hará con la medida de control que aporta el método junto con otras medidas complementarias, como, por ejemplo, las de tipo organizativo.

También deberá tenerse en cuenta si existen recomendaciones sobre el uso y eficacia de las medidas preventivas basadas en estudios, como, por ejemplo, las relacionadas con las vitrinas de laboratorio (6). Entre esas consideraciones se encuentran mantener una velocidad del aire en la abertura de la guillotina entre

0,4 y 0,6 m/s, manipular el producto con movimientos lentos y con la menor energía posible, trabajar lo más lejos posible de la guillotina, no almacenar productos en la vitrina y evitar las corrientes de aire cercanas. Además, las vitrinas de caudal variable y velocidad constante resultan más eficaces frente a la protección de la exposición a nanomateriales que las vitrinas de compensación.

Para evaluar el riesgo se podrían utilizar también otro tipo de metodologías como la de la norma ISO/TS 12901-2:2014 o la *Stoffenmanager* módulo nano (7,8), que incorporan más variables para el análisis de la exposición laboral y pueden aportar información adicional sobre el riesgo y las medidas de control.

**Agradecimientos: Al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)**



## Bibliografía

- (1) INSHT. Estrategia Española de Seguridad y Salud en el Trabajo 2015-2020.  
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/ESTRATEGIA%20SST%2015\\_20.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/ESTRATEGIA%20SST%2015_20.pdf)
- (2) "Application of a pilot control banding tool for risk level assessment and control of nanoparticle exposures" (2008) (*Annals of Occupational Hygiene* 52(6):419-428)
- (3) "Evaluating the Control Banding Nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures" (2009) (*Journal of Nanoparticle Research* 11(7):1685-1704)
- (4) European Commission (2014). Guidance on the protection of the health and safety of workers from the potential risks related to nanomaterials at work.
- (5) INSHT (2015). Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales.
- (6) Tsai S, Ada E, Isaacs J et ál. (2009). Airborne nanoparticle exposures associated with the manual handling of nanoalumina and nanosilver in fume hoods. *J Nanopart Res*; 11:[147-61]
- (7) INSHT (2013). Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas. Método Stoffenmanager Nano 1.0.
- (8) INSHT. Comparación de los métodos de evaluación cualitativa del riesgo por exposición a nanomateriales. CB NANOTOOL 2.0, STOFFENMANAGER NANO 1.0  
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLICACIONES/EN%20CATALOGO/Higiene/2014%20Comparacion%20metodos%20evaluacion%20nano/Comparacion%20de%20los%20metodos%20para%20nanomateriales.pdf>