

## Gobernanza nanotecnológica: por qué no podemos confiar en evaluaciones de riesgo científicas

FERN WICKSON\*

**RESUMEN:** El discurso sobre el riesgo domina las sociedades industriales modernas y se destaca especialmente en las discusiones relativas a la aceptación de nuevas tecnologías. Para un avance tecnológico responsable, la opción típica es la toma de decisiones basada en “una sólida evaluación científica del riesgo”. A pesar de las serias limitaciones en nuestra capacidad para entender y predecir los impactos potenciales de las nanotecnologías emergentes, el discurso del riesgo sigue dominando las discusiones públicas y políticas sobre desarrollo y regulación de este nuevo campo de investigación. En este artículo: 1) describiré alguna de la literatura de las ciencias sociales clave en el análisis del riesgo como herramientas de ayuda en la toma de decisión; 2) daré una idea general acerca de las investigaciones científicas emergentes sobre riesgos asociados a las nanotecnologías, incluyendo la amplia incertidumbre que rodea dicho trabajo; 3) subrayaré el modo en que el discurso sobre riesgos reduce el marco de discusión a cerca de la conveniencia de los desarrollos tecnológicos y, 4) señalaré algunas de las herramientas alternativas de ayuda en la toma de decisión que puedan comenzar a orientar la discusión acerca de las nanotecnologías más allá del foco exclusivo y reducido del discurso sobre el riesgo.

**PALABRAS CLAVE:** riesgo, nanotecnología, análisis, ciencia, tecnología.

**ABSTRACT:** The discourse of risk dominates modern industrialized societies and is particularly prominent in discussions relating to the acceptability of new technologies. For responsible technological advance, the typical call is for decision-making based on a ‘sound scientific assessment of risk’. Despite the serious limitations in our ability to understand and predict the potential impacts of emerging nanotechnologies, the discourse of risk continues to dominate public and political discussions on the development and regulation of this new field of research. In this article, I will: 1) describe some of the critical social science literature on risk analysis as a decision-aiding tool; 2) outline the emerging scientific research on risks associated with nanotechnologies, including the sea of uncertainty that surrounds this work, 3) highlight how the discourse of risk narrows the frame of discussion about the desirability of technological developments and, 4) point to some of the alternative decision-aiding tools that could begin to push discussions about nanotechnologies beyond a sole focus on the narrow discourse of risk.

**KEYWORDS:** risk, nanotechnology, analysis, science, technology.

### EL DISCURSO DEL RIESGO

En una tesis de ciencias sociales ampliamente citada, Ulrich Beck argumenta que el ‘riesgo’ se ha convertido en el concepto organizador central en las sociedades industriales modernas (Beck, 1986). La idea aquí es que la gente en las sociedades industrializadas comenzó a darse cuenta de que la aplicación de la ciencia y la tecnología está usualmente acompañada de efectos adversos no deseados. O, en palabras de Beck, que “las fuentes de riqueza están ‘contaminadas’ por crecientes ‘peligrosos efectos se-

---

\* GenØk Centre for Biosafety Tromsø, Noruega. fern.wickson@genok.no

cundarios” (*Ibid.*). Esto argumenta Beck, ha llevado a incrementar el enfoque sobre los ‘riesgos’ asociados al desarrollo científico y tecnológico y con la preocupación política de cómo identificar y manejar daños potenciales. Técnicamente, los riesgos han sido definidos como la probabilidad de que habrá un peligro, multiplicado por la magnitud de su impacto (Harding, 1998). En otras palabras:

riesgo = posibilidad de que un evento indeseable ocurrirá \* alcance de sus consecuencias.

Cuando son utilizados como una herramienta de ayuda en la toma de decisión, los análisis de riesgo generalmente adoptan un concepto realista del mismo (Adams, 1995; Robins, 2002). Es la idea de que el riesgo existe “allá afuera” y de que puede ser cuantificado de modo preciso y objetivo por un grupo de científicos expertos. Un concepto realista de riesgo sugiere que los científicos expertos son capaces de calcular el grado de riesgo real asociado a cualquier tecnología. Otras posturas u opiniones acerca de los riesgos implicados son, por consiguiente, consideradas como falsas y/o irracionales y derivados de una falta de conocimiento. El análisis realista de los riesgos puede ser visto como una aproximación tecnocrática a la toma de decisiones porque sugiere que se pueden tomar decisiones racionales, objetivas y políticamente neutrales si se confía en científicos expertos. Al tiempo que los gobiernos utilizan de forma abrumadora el discurso de riesgo como regulador, la comprensión realista y su definición técnica, también tienden a adoptar un enfoque de la toma de decisión que privilegia el conocimiento científico y la voz de los ‘expertos’. La visión de este enfoque realista del riesgo como el más apropiado y la resultante autoridad incuestionable que otorga a los científicos expertos en la toma de decisión política en nuevas tecnologías ha sido, sin embargo, criticada desde varias disciplinas de las ciencias sociales.

### *Investigación sobre el riesgo en las ciencias sociales*

Hay tres campos clave en la investigación en ciencias sociales que han desafiado la viabilidad o lo adecuado del enfoque técnico o ‘realista’ del riesgo en la toma de decisiones de regulaciones sobre las nuevas tecnologías. Existen: la investigación psicométrica (dentro de la disciplina de la psicología), la teoría de la cultura (desde la sociología y la antropología) y las tipologías de la incertidumbre (desde los estudios de ciencia y tecnología). Estos campos de investigación sugieren que el discurso realista del riesgo no logra dar cuenta de algunos factores importantes que influyen y moldean cualquier análisis de riesgos asociado con un desarrollo tecnológico particular. Estos factores descuidados, incluyen: las características del riesgo en cuestión, la influencia de visiones del mundo divergentes, y el rol y la relevancia de diversos tipos de incertidumbre. La investigación psicométrica desafió la idoneidad de la noción realista del riesgo sugiriendo que mientras los expertos tienden a calcular los riesgos solamente en relación con probabilidades estadísticas e índices de mortalidad, existen otras características que tienen importante influencia en el modo en que los riesgos son evaluados por una amplia cantidad de personas, incluyendo: si los riesgos son tomados de forma voluntaria, cuán familiares son, cuán controlables son, si tienen o no potencial catastrófico o si tienen potencial para impactar a generaciones futuras (Slovic *et al.*, 1982; Slovic, 1987 y 1991). Esto significa, por ejemplo, que mientras los riesgos para la salud humana que provienen de manejar un auto pueden parecer inicialmente como prohibitivamente altos, la gente tiende a aceptar este riesgo porque

es familiar y ha sido tomado voluntariamente. No obstante, esta misma gente no aceptaría el riesgo físico —aparentemente bajo— asociado al poder nuclear, debido a su escasa familiaridad con dicho riesgo y por la falta de capacidad para tomar este riesgo de modo voluntario, así como por el potencial catastrófico de su impacto si las cosas salen mal y el modo en que sus desechos afectarán a generaciones futuras. Al destacar la importancia de las características de los riesgos en cuestión, la investigación psicométrica ha sugerido que la gente es generalmente sensible a consideraciones no-estadísticas y que tienden a llevar a cabo una evaluación más contextual de los riesgos planteados por una tecnología particular (Slovic, 1987 y 1991; Otway, 1987). Por lo tanto, esta investigación sugiere que hay muchas características importantes de los riesgos tecnológicos que no son capturadas en el proceso de análisis del riesgo elaborado por expertos, pero que resultan importante para las personas y su aceptación de nuevas tecnologías y que por ello, tales consideraciones deberían ser incorporadas de modo más directo en el proceso de toma de decisiones (Slovic, 1998; Otway, 1980).

El campo de la teoría de la cultura ha argumentado que los debates sobre el riesgo, de hecho, no son principalmente sobre riesgos físicos, sino que se relacionan con creencias subyacentes relativas al modo que se considera más apropiado para la organización social y sobre la naturaleza de la naturaleza. En una primera instancia, la teoría de la cultura presenta una tipología caracterizando las creencias sobre las formas preferidas de organización social, como ser: individualista (preferencia de libertad de ataduras), jerárquica (apoya una organización social jerárquica), igualitaria (fuertes lealtades grupales pero se niega el apoyo a reglas impuestas desde afuera) o fatalista (no apoya a grupos organizados ni a la creencia del control individual) (Douglas y Wildavsky, 1982; Schwarz y Thomson, 1990; Thompson, Ellis y Wildavsky, 1990). La idea es que dependiendo de la forma de organización social preferida, usted seleccionará tipos de riesgos particulares que considera valen la pena ponerles atención y apoyará diferentes estrategias para su manejo. Por ejemplo, de modo esquemático, en el caso de las nanotecnologías, los ‘individualistas’ preferirán el uso de mecanismos de mercado bajo estrictos sistemas legales, como modo de regular el campo y controlar cualquier riesgo potencial. Los ‘jerárquicos’ confiarán en la autoridad de expertos y de aquellos en el poder como los mejores situados para tomar tales decisiones. Los ‘igualitaristas’ pelearán por ampliar las bases de participación en las decisiones sobre medidas de regulación relevantes y sistemas de control. Mientras, los ‘fatalistas’ considerarán que no vale la pena tomar parte del debate, debido a su creencia en la imposibilidad de lograr alguna diferencia en el modo en que la tecnología será desarrollada y utilizada. Para cuestiones de riesgos medioambientales, la teoría de la cultura sugiere que puede utilizarse una cuarta tipología para caracterizar las diferentes visiones sobre la naturaleza. En términos generales, estas visiones diferentes son presentadas como: naturaleza robusta, naturaleza frágil, naturaleza tolerante y naturaleza impredecible (Adams y Thompson, 2002). De nuevo, la idea aquí es que nuestras creencias acerca de la naturaleza impactan en el modo de pensar sobre riesgos particulares. Por ejemplo, aquellos que piensan que la naturaleza es esencialmente robusta y que perdona cualquier insulto que los seres humanos le causen, es poco probable que se preocupen por los riesgos planteados por las nanopartículas, mientras que aquellos que ven a la naturaleza frágil y en un delicado equilibrio, quizás se preocupen mucho por el potencial daño que pueden plantear las nanopartículas para el medio ambiente y convoquen a una moratoria hasta que se conozca más sobre el tema. Aquellos que perciben a la naturaleza como tolerante dentro de ciertos límites, probablemente en-

focarán su atención en el desarrollo de sistemas de regulaciones y monitoreo que permitan identificar aplicaciones particulares que pueden ser de preocupación, mientras que aquellos que ven a la naturaleza como inherentemente impredecible, no tendrán fe en la capacidad humana para predecir o controlar cualquier impacto potencial, ya sea bueno o malo. Al proveer tipologías que pueden ser utilizadas para caracterizar diferentes visiones de mundo (incluyendo las formas preferidas de organización social y creencias acerca de la naturaleza), el objetivo de la teoría de la cultura es permitir que las diferentes premisas y creencias que subyacen y enmarcan los debates sobre riesgos físicos se hagan más explícitos y que adquieran mayor transparencia los aspectos profundos que subyacen a las controversias (Schwarz y Thompson, 1990).

Mientras los enfoques psicométricos enfatizan en la importancia de la psicología individual y la teoría de la cultura enfatiza en la importancia de los compromisos sociales, ambos representan aproximaciones constructivistas del riesgo, en lugar de aproximaciones realistas. De acuerdo con estos enfoques constructivistas, no existe un grado 'real' de riesgo que pueda ser capturado por medio de un proceso de evaluación de riesgos llevado a cabo por científicos expertos que se enfocan solamente en cálculos de probabilidad estadística. Este proceso es considerado inadecuado, sea porque falla al no tener en cuenta la naturaleza de los riesgos implicados (si son familiares, controlables, reversibles, etc.) o porque no logra considerar el modo en que dichos juicios acerca de los riesgos pueden ser enmarcados de modo diferente de acuerdo con las diversas creencias sobre la sociedad y la naturaleza.

El desafío final para la adecuación de las nociones realistas del riesgo en la toma de decisiones que describiré aquí, es la emergencia de diferentes tipologías de incertidumbre desde el campo de los estudios de la ciencia y la tecnología (Wynne, 1992; Stirling, 1999A; Stirling y Gee 2002; Funtowicz y Ravetz, 1993; Felt Y Wynne, 2007). Si bien las tipologías emergentes difieren en el modo en que delinear las fronteras de diferenciación, se pueden sintetizar algunos patrones generales, tal y como se expresa a continuación:

*Riesgo* siempre implica incertidumbre hasta cierto punto. Si estuviéramos ciertos de que un impacto particular podría (o no podría) ocurrir, hablaríamos de eso como una certeza, no como un 'riesgo'. De cualquier modo, de acuerdo con las tipologías emergentes, el término riesgo es definido como específicamente relevante para aquellas situaciones en las cuales pueden caracterizarse tanto los resultados potenciales como las probabilidades asociadas a esos resultados.

*Incertidumbre* es un término que puede ser aplicado a esas situaciones donde existe algún acuerdo sobre los resultados potenciales o impactos que pueden ocurrir, pero las bases para asignar probabilidades no son fuertes. Esto se debe a la falta de información relevante, pero esta falta puede ser reducida por medio de una mayor investigación.

*Indeterminación* se refiere al tipo de incertidumbre que existe debido a la complejidad asociada con los resultados predecibles (y probabilidades) en diversos sistemas sociales y naturales abiertos e interactuantes. Esta complejidad significa que nuestro conocimiento siempre será condicionado y falible porque la ciencia simplemente es incapaz de tomar en cuenta cada uno de los factores de un sistema dinámico.

*Ambigüedad* es un tipo de incertidumbre que resulta de la información contradictoria o de la existencia de marcos de supuestos y valores divergentes. Este

tipo de incertidumbre surge porque existen, por ejemplo, diferentes enfoques para generar conocimiento, diferentes interpretaciones del significado del conocimiento generado, diferentes modos de evaluar la calidad y fortaleza del conocimiento y diferentes modos de entender cómo debe actuarse a la luz del conocimiento.

*Ignorancia* se refiere a nuestra incapacidad de conceptualizar, articular o considerar resultados y relaciones causales que subyacen a nuestros marcos de entendimiento cotidianos. Este tipo de incertidumbre ha sido descrito como las cosas 'que sabemos que no sabemos' y representan la incapacidad de formular las preguntas correctas, más que el fracaso de plantear las respuestas adecuadas.

Esta tipología es resumida en la tabla 1.

**TABLA 1.** Tipología de incertidumbre en la ciencia para la elaboración de políticas

Tipo de incertidumbre	Explicación
FORMAS CUANTITATIVAS	
<b>Riesgo</b> (Probabilidad calculada)	Podemos imaginarnos el impacto posible y calculado de probabilidad de ese impacto cuando ocurra, aún cuando no se sepa si va a ocurrir o no
<b>Incertidumbre</b> (Lo que no ha sido calculado)	Podemos imaginarnos un impacto posible pero no sabemos la probabilidad de que pueda ocurrir. Es posible calcular esa probabilidad, pero no tenemos aún el conocimiento suficiente como para hacerlo.
formas cualitativas	
<b>Indeterminación</b> (Incapacidad de calcular de modo completo)	Para sistemas complejos, abiertos e interactivos, es imposible incluir todos los factores relevantes y las interacciones en los cálculos, por eso, el conocimiento es condicional y falible
<b>Ambigüedad</b> (Diversas formas de enmarcar el cálculo)	Podemos enmarcar de modo diverso los impactos en los que estamos interesados y el modo en que nos aproximamos, interpretamos y entendemos el conocimiento y los cálculos generados por aquellos
<b>Ignorancia</b> (No se sabe qué calcular)	No podemos imaginarnos el impacto posible. No sólo no hemos calculado todavía la probabilidad del evento, sino que desconocemos aquello que debemos calcular.

Si nos enfocamos solamente en una cuantificación de los riesgos, el discurso realista generalmente no logra tomar en cuenta la ambigüedad, indeterminación, ignorancia e incluso la incertidumbre en algunos casos (Stirling, 1999A; Funtowicz y Ravetz, 1993).

Estas diferentes formas de incertidumbre crean un espacio mediante el cual diferentes visiones, valores y supuestos moldean percepciones y evaluaciones diver-

gentes sobre el riesgo. Al no lograr manejar las incertidumbres de modo explícito y transparente, así como los valores y las suposiciones que operan por medio de aquellas, significa entonces que los factores psicológicos y sociales que influyen en las evaluaciones de riesgo (según lo descrito por la psicometría y la teoría de la cultura) quedan implícitos y ocultos durante la toma de decisiones. Esto también significa que el proceso de toma de decisiones basado en análisis realistas sobre los riesgos seguirá siendo materia de debate permanente, mientras las personas continúen enfatizando diferentes características de los riesgos en cuestión y argumentando desde premisas que compiten entre sí en relación con la organización biológica y social. La capacidad para manejar de manera transparente la toma de decisiones e incorporar un criterio social y cultural más amplio en el proceso de evaluación, depende de una reconceptualización del rol de los expertos (Slovic, 1998), una mejorada atención con respecto a las dimensiones sociales y éticas del desarrollo tecnológico y del aliento a una mayor participación pública en el proceso de toma de decisiones (Wynne, 2001).

## RIESGO Y NANOTECNOLOGÍA

En las nanotecnologías, el riesgo aparece como un concepto central en los debates actuales y la toma de decisiones. En esta sección, señalaré algunas de las nuevas investigaciones relativas a los riesgos en nanotecnología y me centraré en subrayar las incertidumbres implicadas y las cuestiones importantes en juego, más allá de aquellas asociadas al riesgo físico. De este modo, el objetivo es el desafiar la idea de que "la evaluación científica del riesgo" es una herramienta adecuada para inofirmar a los tomadores de decisiones en el avance de las nanotecnologías.

### *Riesgos potenciales de las nanociencias y nanotecnologías*

En los últimos cinco años, ha habido un dramático crecimiento en el interés sobre los potenciales impactos de las nanociencias y nanotecnologías (nanoST)<sup>1</sup> en la salud y el medioambiente. Esto se debe, en parte, a que no puede asumirse que las 'nuevas propiedades' que caracterizan la nanoescala serán nuevas para bien. No obstante, la respuesta a la pregunta "¿cuáles son los riesgos de la nanoST?" está en disputa porque el nivel de conocimiento científico disponible ha sido descrito como "rudimentario" (Balbus *et al.*, 2007) y el nivel de incertidumbre como "extremo" (Kandlikar *et al.*, 2007). En el caso del impacto de la nanoST en salud y en el medio ambiente, las denominadas 'brechas' del conocimiento se ensanchan, apareciendo como abismos enormes. No obstante, está comenzando a surgir investigación en este tópico, y algunos de los resultados clave y desafíos futuros son sintetizados aquí.

---

<sup>1</sup> En este punto, es importante comenzar a utilizar la terminología en plural, esto es, nanociencias y nanotecnologías en lugar de nanotecnología. Esto se debe a que cuando se habla de riesgos en un sentido más amplio, es importante ser capaz de distinguir entre diferentes formas de nanotecnologías y ser lo más específico posible. Asimismo, es importante incluir aquí a las nanociencias, porque también puede haber riesgos asociados a las propias prácticas de investigación y con productos manufacturados para la investigación en nanociencia.

## ¿LOS NANOTUBOS DE CARBONO PODRÍAN SER LOS NUEVOS ASBESTOS?

Los nanotubos de carbono comparten una estructura similar a la de los asbestos en tanto que ambos parecen pequeñas fibras tipo agujas. Por eso, una pregunta apremiante es ¿Pueden los nanotubos de carbono plantear los mismos riesgos que los asbestos? La respuesta proveniente de las primeras investigaciones científicas parece ser ‘Sí’. En la investigación actualmente disponible, los nanotubos de carbono han demostrado que causan inflamaciones y granulomas (lesiones por cicatrices) (Poland *et al.*, 2008; Muller *et al.*, 2005; Shedova *et al.*, 2005; Warheit *et al.*, 2004; Ma-Hock *et al.*, 2009; Lam *et al.*, 2004; Sanchez *et al.*, 2009), que es la misma respuesta corporal que resulta de la exposición a los asbestos y que antecede a la formación de cáncer, como la mesotelioma. Ha sido demostrado que los nanotubos de carbono también tienen una potencial toxicidad para las células de la piel por medio de la exposición dérmica (Shedoca *et al.*, 2003) y la genotoxicidad (toxicidad a nivel molecular) incluyendo la capacidad de dañar el ADN (Zhu *et al.*, 2007; Poland *et al.*, 2008).

Los nanotubos de carbono pueden ser de una o varias paredes, presentarse en una serie de tamaños diferentes, tienden a aglomerarse y pueden contener diferentes cantidades de residuos provenientes de catalizadores metálicos empleados durante la producción de los mismos. Todos estos factores tienen el potencial de impactar en la toxicidad observada. Los estudios mencionados arriba han sido llevados a cabo con diferentes:

- tipos de nanotubos de carbón (monocapa y multicapa);
- longitudes de nanotubos de carbono (cortos y largos);
- preparaciones experimentales (tubos individuales, aglomerados enredados, pedazos);
- sistemas de experimentación (por ejemplo, cultivos de células, ratones y ratas);
- métodos de exposición (inhalación, inyección, deposición dermal).

Mientras que esta diversidad de estudios los hace extremadamente difícil para su comparación, podría decirse que la totalidad de los resultados pueden ser interpretados como indicadores de un patrón emergente del *potencial* de los nanotubos de carbono para causar daño.

No obstante, para comprender la magnitud en la que en realidad se manifestará cualquier daño potencial, es importante entender la medida en la que serán expuestos los trabajadores, los consumidores y el medioambiente. Los nanotubos de carbono representan una de las “áreas *boom*” de la nanoST, con un mercado global calculado en más de 800 millones de dólares en 2011 (BCC Research, 2007). No obstante, actualmente, hay información disponible extremadamente limitada sobre los niveles de exposición de los nanotubos de carbono. La que está disponible sugiere que los trabajadores en industrias de nanotecnologías y en instalaciones de investigación y desarrollo están expuestos hasta cierto grado, por medio de la inhalación y la deposición dermal (Bergamaschi, 2009. Una importante excepción es Maynard *et al.*, 2004; ). Sin embargo, esta información no dice nada sobre las exposiciones públicas (de las personas) y medioambientales, así como tampoco tiene en cuenta el crecimiento esperado en los niveles futuros de exposición, al tiempo que el uso sea expandido.

En estudios de toxicidad y exposición, es también crucial tener en cuenta la increíble persistencia de los nanotubos de carbono, que se ha sugerido, representa uno

de los materiales disponibles en la actualidad, hechos por el ser humano, que son de los menos biológicamente degradables (Shedova *et al.*, 2003). Esto hace que sea particularmente importante considerar los ciclos de vida completos, plazos suplementarios y la posibilidad de retrasos entre la exposición y los efectos. Al reconocer el valor de tomar medidas preventivas frente a la actual investigación científica, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (National Institute for Occupational Safety and Health, 2010) de Estados Unidos ha propuesto recientemente que se recomienda una exposición límite de 7 microgramos de nanotubos de carbono o nanofibras por metro cúbico de aire. Esta figura ha sido sugerida debido a que hoy en día es la concentración más baja que puede ser medida de modo confiable.

Los desafíos para entender los riesgos planteados por los nanotubos de carbono se vinculan no solo a la información disponible limitada sino también al profundo debate acerca de los paradigmas, métodos y aproximaciones apropiados para los estudios de toxicidad. Por ejemplo, en los estudios diseñados y conducidos de acuerdo con un paradigma de fibro-toxicología, los nanotubos largos aparecen menos patógenicos. No obstante, si se examinan de acuerdo con métodos y enfoques que dan mayor relevancia a las partículas, los nanotubos más cortos pueden también demostrar una toxicidad significativa (Shedova *et al.*, 2005). Mientras que resulta relevante para los nanotubos, este último paradigma ha sido ampliamente aplicado para entender la toxicidad de nanopartículas diseñadas.

#### NANOPARTÍCULAS DISEÑADAS EN SISTEMAS BIOLÓGICOS

Existe consenso en la comunidad científica acerca de que la toxicidad de las nanopartículas diseñadas<sup>2</sup> no puede derivarse de nuestro entendimiento sobre esos mismos materiales a la macroescala o en bulto (Donaldson *et al.*, 2006; Oberdörster *et al.*, 2005; SCENIHR, 2005; Owen y Handy, 2007). No obstante, puede argumentarse que las nanopartículas de materiales están de hecho predispuestas a ser más tóxicas. Esto se debe a que como las partículas más pequeñas tienen áreas superficiales más grandes y las superficies son generalmente más reactivas, las partículas a nanoescala tienen la capacidad de penetrar e interactuar con sistemas biológicos de modos que difieren a los de los materiales en bulto contraparte. Además, debido a que las nanopartículas diseñadas son tan pequeñas, tienen la capacidad de moverse a través de membranas celulares, entrar en el torrente sanguíneo, la médula ósea, el cerebro y el feto (Oberdörster *et al.*, 2005; SCENIHR, 2005; Oberdörster, 2004; Lockman *et al.*, 2004; Takeda *et al.*, 2009). Las nanopartículas diseñadas también tienen la capacidad de actuar como vectores, capaces no sólo de enlazarse y acarrear otros químicos y contaminantes mientras se mueven a través de los sistemas biológicos, sino también de aumentar su toxicidad y su disponibilidad biológica (Baun *et al.*, 2008). Esto ha sido denominado como efecto ‘Caballo de Troya’ (Royal Commission on Environmental Po-

---

<sup>2</sup> El término ‘nanopartículas diseñadas’ es utilizado para indicar que el foco aquí no está sobre las partículas a nanoescala producidas de modo natural, sino en aquellas diseñadas a propósito y manufacturadas por el ser humano. Podemos, ciertamente, aprender de nuestra experiencia con partículas de nanoescala ‘naturales’ (e.g. que frecuentemente tienen el potencial de hacer daño) y del método desarrollado para estudiarlas (e.g. investigación en partículas ultrafinas), pero es también importante notar que la generación deliberada de nanopartículas está creando una serie de materiales nuevos y que las características únicas de éstos necesitan ser investigadas para entender su potencial (eco)toxicológico.

llution, 2008; Handy y Owen, 2008). Todas estas características han resultado en un llamado de atención a que los materiales a la nanoescala y, particularmente, las nanopartículas diseñadas, sean tratados y evaluados como sustancias nuevas en los estudios de toxicidad y en lo que respecta a su regulación.

### *¿Evaluaciones comprensivas de riesgo como respuesta?*

Mientras el potencial para el daño a la salud humana y al ambiente está siendo crecientemente reconocido por la nanoST, la respuesta más común a los daños potenciales es la de enfatizar la necesidad de evaluaciones científicas de riesgo. Se asume que mientras que sea llevada a cabo una evaluación científica de riesgo, cualquiera de los daños potenciales pueden ser identificados, manejados y mantenidos dentro de límites tolerables. En esta sección, me enfocaré en algunos de los problemas que enfrenta esta estrategia cuando deviene como la única proveedora de *inputs* para la toma de decisiones en el desarrollo de nanoST.

#### EL DESAFÍO SUSTANCIAL DE LA NANO(ECO) TOXICOLOGÍA

La complejidad de evaluar científicamente los riesgos de los nanomateriales para humanos y el ambiente no debe ser subestimada. Como se ha indicado arriba, las nuevas propiedades que emergen como características de la nanoescala significan que no podemos extrapolar el entendimiento de la toxicidad de los nanomateriales a partir de nuestra experiencia con los mismos materiales en forma de bulto. Los factores más importantes para entender la toxicidad tampoco son necesariamente los relacionados con la métrica tradicional de dosaje en tanto masa o número, sino que pueden ser características como el área de superficie, la carga de la superficie, la longitud, la forma, el estado de aglomeración y la solubilidad. Estas características difieren en los distintos nanomateriales, así como en las diferentes formas o ‘especies’ del mismo nanomaterial.

Además, todas las características mencionadas arriba, que resultan importantes para entender la toxicidad, pueden ser alteradas en su interacción con factores ambientales como el pH, la salinidad, la dureza del agua y la presencia de materia orgánica (Baun *et al.*, 2008; Royal Commission on Environmental Pollution, 2008). Esto significa que las propiedades relevantes pueden cambiar a lo largo del ciclo de vida de un producto (Poland *et al.*, 2008; Baun *et al.*, 2008). Asimismo, no sólo la variedad de productos nanomateriales sugieren la posibilidad de patrones de exposición múltiples (incluyendo ingestión, inhalación, inyección y exposición dérmica) (Oberdörster *et al.*, 2005), sino que también puede ser relevante considerar diversas rutas [de exposición] en las diferentes etapas a lo largo del ciclo de vida del producto (Bergamaschi, 2009). Súmese además que la movilidad de las nanopartículas significa que éstas se pueden translocar a partes del cuerpo de los organismos vivos que pueden no estar indicadas como relevantes por la ruta de exposición inicial. Las diferentes especies tienen también diferentes susceptibilidades frente a los nanomateriales, lo que significa que las pruebas realizadas con una sola especie son insuficientes para entender los riesgos medioambientales (Baun *et al.*, 2008).

Más aún, entender el riesgo ecológico requiere una preocupación acerca del destino y el comportamiento de los nanomateriales en el medioambiente (por ejemplo, sus movimientos a través del suelo, aire, agua y los diversos organismos de un eco-

sistema). Para sumar a este cuadro sumamente complejo, es un hecho que las pruebas deberían idealmente ser realizadas no sólo considerando los efectos agudos, sino también considerando el potencial de efectos crónicos, efectos multitróficos (por medio de la cadena alimenticia), bioacumulación e impactos subletales como el cambio de comportamiento y la reducción de inmunidad o aptitud reproductiva (Owen y Handy, 2007).

Esto significa que, con el fin de “evaluar científicamente los riesgos” planteados por los nanomateriales para la salud humana y el ambiente, necesitamos una investigación que:

- documente las diversas características psicoquímicas de cada nanomaterial a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto;
- considere las múltiples rutas de exposición del organismo;
- pruebe diversas especies de organismos (incluidos los microorganismos);
- examine diversas partes del cuerpo de los organismos expuestos (incluidos los componentes celulares);
- refleje los movimientos potenciales a lo largo de ecosistemas complejos;
- utilice un marco temporal extendido;
- sea sensible a una amplia diversidad de posibles impactos más allá de la toxicidad aguda y la muerte.

Como si esto no fuera lo suficientemente difícil, lo que hace que las cosas empeoren es el hecho de que para el caso de los nanomateriales, no se han desarrollado los métodos y los instrumentos necesarios para llevar a cabo las pruebas requeridas (Grieger *et al.*, 2009). Esto abarca los niveles tan fundamentales como la carencia de modos para detectar, medir, caracterizar y, por lo tanto, monitorear, nanopartículas en una amplia gama de medios (Poland *et al.*, 2008; SCENIHR, 2005; Handy y Owen, 2008; EFSA, 2009). Esto significa que no solo existe investigación extremadamente limitada sobre la toxicidad de los nanomateriales, sino que también hay incapacidad para lograr estas investigaciones en el corto plazo. De hecho, se ha sugerido que las pruebas de toxicidad solamente para los nanomateriales comercialmente disponibles en la actualidad, tomaría décadas para ser completada y que requiere de una inversión de más de mil millones de dólares (Baun *et al.*, 2008; Choi, Ramachandran y Kandlikar, 2009). A pesar de las declaraciones realizadas periódicamente sobre la importancia (Editor, 2008) vital de la investigación (eco)toxicológica, actualmente, los fondos disponibles son extremadamente limitados. El financiamiento para investigación en la salud humana y el medioambiente suele combinarse con el financiamiento disponible para investigación en aspectos éticos, legales y sociales, y, en total, ambos obtienen cerca del 3-5% de los presupuestos disponibles para el desarrollo de nanoST.

Esta situación genera una cantidad importante de paradojas:

- las especificidades toxicológicas, podría decirse, requieren que los nanomateriales sean evaluados sobre una base de caso por caso, pero esto es prácticamente imposible (Walker y Bucher, 2009);
- necesitamos una caracterización fisicoquímica para los nanomateriales a lo largo de sus ciclos de vida, pero en la actualidad no existen buenos métodos disponibles para ello (SCENIHR, 2005);

- hay una necesidad crítica de información sobre niveles de exposición, pero se requieren nuevos métodos y equipos para detectar y medir adecuadamente las nanopartículas (*Ibid.*);
- Sólo la masa y el número no son suficientes como mediciones de dosis y, sin embargo, factores alternativos como el área superficial y la química superficial no forman parte de las evaluaciones normativas de seguridad;
- se necesita urgentemente más investigación, pero hay una falta de procedimientos estándares de pruebas y de materiales de referencia que permitan un desarrollo coordinado y la comparación entre estudios.

Esta situación ha llevado a algunos organismos ambientalistas (ETC Group, 2009; Friends of the Earth Australia, 2006) y a políticos (Anónimo, 207; Lucas, 2003) a convocar una moratoria en la comercialización. También ha llevado a organizaciones científicas de peso a recomendar que debe evitarse al máximo grado posible la liberación [de nanomateriales] al medioambiente (Royal Society & The Royal Academy of Engineering, 2004).

Mientras que la sugerencia de una moratoria a nivel comercial, hasta tanto se reuna mayor cantidad de información, ha generado controversias, lo que parece claro es que la tradicional herramienta de la “evaluación científica de riesgos” para la toma de decisiones está siendo lastimada debido a la profunda falta de información sobre nano(eco)toxicología. Las grandes lagunas de incertidumbre y las décadas requeridas para llevar a cabo la investigación necesaria significan que la idea de la toma de decisiones por medio de una evaluación científica de los riesgos deberá ser reconocida como imposible en la actualidad (Bergamaschi, 2009; Royal Commission on Environmental Pollution, 2008). Existe, por lo tanto, la necesidad de apartarnos del enfoque de la “evaluación científica de riesgos” como la única herramienta de ayuda necesaria para la toma de decisiones, y movernos hacia una exploración de enfoques que nos permitan una negociación deliberada de la incertidumbre. Esto *no* implica sugerir que las evaluaciones de riesgo basadas en la mejor investigación nanotoxicológica disponible no sean llevadas a cabo para ayudar a informar en la toma de decisiones, sino que en tanto se presente como única evaluación, debe ser reconocida como insuficiente.

#### EL ROL DE LOS VALORES EN LAS PRUEBAS (ECO)TOXICOLÓGICAS

El grado extremo y los diversos tipos de incertidumbre involucradas en la nanoST hacen especialmente vital el reconocimiento de la importancia de los aspectos sociales y éticos en la toma de decisiones, incluyendo el rol clave jugado por las visiones, valores y creencias en el impulso hacia adelante de esta trayectoria tecnológica. Negociar las situaciones de incertidumbre implica realizar elecciones sin un conocimiento completo, lo cual significa que estas elecciones no pueden dejar de estar influenciadas por valores, creencias, suposiciones y visiones del mundo. No obstante, es importante reconocer que los valores permean todas las etapas, incluyendo la de la investigación científica. Por ejemplo, en la investigación (eco)toxicológica en nanoST, los científicos tienen que llevar a cabo diversas elecciones que están influenciadas por valores personales y culturales, creencias y suposiciones. Esto incluye:

- qué nanotecnología ha de estudiarse (por ejemplo, qué nanopartícula es considerada como la más relevante, interesante o importante);

- cuál sera el sujeto de la prueba a utilizar (por ejemplo, qué organismo o que parte de los efectos de un organismo deberían ser sometidos a prueba);
- qué sistema de prueba, métodos, herramientas o paradigmas se utilizarán (por ejemplo, en qué métrica de dosaje se enfocará –masa de partículas, número de partículas o área superficial de las partículas);
- qué ruta de exposición se examinará (por ejemplo, inyección, inhalación, ingestión o deposición dermal);
- Qué criterios de valoración serán observados (por ejemplo, si se observarán muertes, lesiones, expresión protéica, comportamiento, tasas de reproducción);
- cómo se interpretarán los resultados (por ejemplo, hasta qué punto están relacionados con la nanopartícula en estudio, impurezas/contaminantes en las muestras de las pruebas, las especificidades de los organismos involucrados, las limitaciones del método, etc.).

Las enormes incertidumbres involucradas significan que los científicos llevan a cabo inevitablemente elecciones al concretar su conocimiento, y que todas estas elecciones son influenciadas por valores y permanecen abiertas a un debate legítimo a través de enmarcamientos [o aproximaciones] e interpretaciones alternativas. Cuando la ciencia es utilizada para informar el proceso de toma de decisiones políticas o para el entendimiento de las personas, reconocer la incertidumbre y la importancia de las diferentes elecciones y supuestos deviene en una cuestión primordial.<sup>3</sup> No obstante, es importante señalar aquí que mientras las interrogantes deliberadas sobre la ciencia para la política es de particular importancia para la nanoST, para la cuestión de la gobernanza, también lo son las negociaciones deliberativas en torno a la asignación de financiamiento y las trayectorias sociotécnicas que se desarrollan como resultado. Esto es de especial importancia para la nanoST debido a que la inversión proveniente del sector público ha sido la principal responsable de estimular el desarrollo y la institucionalización del campo (Bürgi, 2006; Schummer, 2007).

### *¿El riesgo como única preocupación social legítima?*

El preo dominio del riesgo como un modo de estructurar la discusión en nanotecnología y su rol en el futuro significa que el daño físico a la salud humana y medioambiental aparece como la única preocupación social legítima. Otras preocupaciones relacionadas con cuestiones sociales y éticas se han relegado a los márgenes del debate y no se les otorga un valor significativo en lo relativo a la toma de decisión. Para que los tomadores de decisiones entren en acción (e.g. para evitar que los fondos se dirijan a nanotecnología o para construir barreras reguladoras que frenen su rápido desarrollo), actualmente se requiere de evidencia concreta sobre los serios riesgos para la salud humana y ambiental. Esto sucede a pesar de que en el debate sobre los organismos genéticamente modificados (GMOs) se demuestra claramente que las preocupaciones de la gente se extienden más allá de los riesgos físicos. Por ejemplo, en el debate sobre los GMOs en agricultura, las preocupaciones de la gente se relacionan generalmente con cuestiones sociales como el control corporativo sobre la cadena ali-

---

<sup>3</sup> Se discute de modo más profundo cómo hacer esto en la sección "Evaluación de pedigrí".

menticia o con cuestiones éticas sobre la integridad de los organismos y la cruza de especies, o de los límites de los reinos (e.g. incorporar genes animales o microbios en una planta). Los riesgos físicos para la salud humana y ambiental son ciertamente importantes para la nanotecnología (vease más arriba), pero no son las únicas cuestiones legítimas de preocupación social. Hay otras cuestiones sociales relevantes, como los impactos potenciales en los mercados de trabajo a nivel nacional e internacional por el reemplazo de productos, así como cuestiones éticas, como de qué modo el desarrollo de nanoST apoya un concepto particular de la relación entre el hombre y el mundo biológico que perpetúa una actitud dominante y arrogante.

Si la nanoST verdaderamente representa un nuevo campo revolucionario de desarrollo con el potencial para ‘impactar todos los aspectos de nuestras vidas cotidianas’, debemos ser prudentes en interrogar algunas de las cuestiones sociales y éticas más amplias que están en juego. Esto implica hacer preguntas como:

- ¿Cuáles son los supuestos subyacentes y visiones que conducen la nanoST hacia adelante?
- ¿Apoyamos esos supuestos y visiones?
- ¿Cómo podrían las aplicaciones cambiar nuestra sociedad y comunidades en la práctica?
- ¿Cómo podrían impactar en conceptos fundamentales como las relaciones humano/naturaleza?
- ¿Quiénes serán los ganadores y quiénes serán los perdedores?
- ¿Cómo podrían ser aplicados los valores éticos de justicia y equidad?
- ¿Podemos elegir perseguir ciertos aspectos y no otros?
- ¿Quiénes o qué está controlando hacia dónde va el campo?
- ¿Cómo debemos controlarlo?
- ¿Podemos dirigir la nanoST hacia la sustentabilidad y el beneficio social?
- ¿Cómo puede contribuir la nanoST a nuestro concepto de “vida buena”?
- ¿Qué queremos priorizar exactamente y en qué queremos invertir nuestro tiempo y dinero?

Algunas de las creencias básicas que apoyan la actual posición permisiva con respecto a la comercialización de la nanotecnología (a pesar de la falta de investigación toxicológica completa) incluye: el crecimiento económico es el máximo bien; toda innovación contribuye al crecimiento económico y por lo tanto es buena; ‘progreso’ es equivalente a avance tecnológico; son posibles las soluciones tecnológicas a problemas futuros. Mientras que estas creencias pueden constituir una verdad para algunas personas, existen alternativas legítimas y, en sociedades democráticas y plurales, éstas deben ser sujetas a la negociación abierta y al debate.

Subyacente a todas las preguntas sobre la política científica está la medida en que creemos que los ciudadanos y las instituciones sociales tienen control sobre las trayectorias de la ciencia y la tecnología. Si creemos que la tecnología determina su propio patrón de desarrollo y, consecuentemente, también nuestras estructuras sociales y creencias culturales (determinismo tecnológico), hay, por supuesto, poco que podamos hacer, excepto tratar y minimizar el impacto de cualquier consecuencia negativa que pueda surgir. No obstante, si creemos que los factores sociales, políticos y económicos (como los organismos financieros, las restricciones legales, las instituciones reguladoras, los patrones de consumo y los valores culturales) juegan un rol

en determinar qué tipo de ciencia y tecnología se persigue, podría decirse que tenemos el poder para jugar un rol colectivo más activo en guiar la ciencia y la tecnología en direcciones que generen mayores beneficios y que sean más deseables de acuerdo con nuestras metas sociales y con nuestros marcos éticos. Esto implica movernos de la 'gobernanza del riesgo' hacia una práctica más amplia de 'gobernanza de la innovación' (Felt y Wynne, 2007).

En lo que sigue, expongo una serie de herramientas alternativas y adicionales para la toma de decisiones que existen en torno a las nuevas tecnologías, orientadas a integrar de modo más directo las consideraciones de cuestiones éticas y sociales. Un uso más extensivo de estos enfoques puede ayudar a los tomadores de decisiones a moverse más allá de cuestiones de riesgos técnicos y abrirse a la consideración de múltiples futuros socio-técnicos potenciales.

## MÁS ALLÁ DEL RIESGO

### *Evaluación de beneficios*

La primera cuestión que es importante notar cuando hablamos de la necesidad de movernos más allá de un solo enfoque de evaluación de riesgos es la paradoja de la toma de decisiones que actualmente existe. Cuando se emplea el discurso del riesgo, los tomadores de decisiones argumentan requerir evidencia concreta del daño físico antes de tomar acciones contra la comercialización de las nanotecnologías. Al mismo tiempo, sin embargo, los gobiernos apoyan el rápido desarrollo de las nanotecnologías basándose en beneficios enormemente hipotéticos y afirmaciones no probadas. Si continuamos considerando los análisis exhaustivos de riesgo para detener el desarrollo, podría argumentarse que quizás por lo menos necesitemos balancear esos análisis con los análisis exhaustivos de beneficios a modo de apoyar dicho desarrollo. Por ejemplo, ¿los beneficios de los calcetines impregnados con nanoplata realmente superan los riesgos que las nanopartículas de plata y los iones implican potencialmente para la salud humana y el ambiente? Mientras que esto puede ser visto como un análisis centrado en el costo-beneficio por encima de un análisis de riesgo, lo que argumento aquí, es simplemente que si los beneficios de aplicaciones particulares de nanotecnología no son sometidos a un escrutinio y estándares de prueba para la toma de decisiones igualmente rigurosos, existe una paradoja que siempre favorecerá a la comercialización de nuevas tecnologías (potencialmente peligrosas).

El actual (y generalmente implícito) enfoque predeterminado es que lo que se considera socialmente beneficioso y deseable es el crecimiento económico y, por lo tanto, como la nanoST apoya esto, el campo es apoyado y alentado (con el mercado como el que se ocupa, en última instancia, de lo que será o no desarrollado). No obstante, han comenzado a emerger para la nanoST otros enfoques que proponen un mayor énfasis en metas sociales específicas y en prioridades éticas. Por ejemplo, la Comisión Europea ha publicado recientemente un Código de Conducta (CoC por sus siglas en inglés) para la investigación en nanoST (European Commission, 2008), que se propone sea utilizado para ayudar a los investigadores a desarrollar proyectos, así como para ayudar a los que financian a decidir qué proyecto financiar.

En el CoC, la investigación nano 'responsable' es presentada como aquella que es llevada a cabo en la línea del principio de precaución, que contribuye al logro de una sociedad sustentable y a los objetivos de desarrollo del milenio, y que es transparen-

te y comprensible para todos. En consulta con los *stakeholders*, la Comisión identificó también áreas de restricción para la investigación en nanoST, incluyendo una prohibición en investigación para el mejoramiento humano y una moratoria selectiva de productos en desarrollo que impliquen intrusión en el cuerpo humano (por ejemplo, comida y cosméticos). Esto significa que al pensar qué campos de investigación deberían ser priorizados y por tanto financiados con recursos públicos, la Comisión Europea está abogando más activamente por desarrollos en direcciones socialmente deseables y negociados públicamente.

### *Evaluación de conocimiento*

Se ha sugerido que cuando lo que está en juego es alto, cuando los valores están en disputa, y las decisiones son urgentes (como lo es, de hecho, en el caso de la nanoST), se necesita un nuevo tipo de ciencia para la política –una ‘ciencia post-normal’ (Funtowicz y Ravetz, 1993). Esto es, una ciencia que tome en cuenta las incertidumbres involucradas y que abra el proceso de “revisión extendida de pares”. Si se sigue utilizando la herramienta de análisis del riesgo, yo diría que al menos debe ser extendida de modo que se incentive este tipo de revisión extendida y el análisis crítico de la calidad del conocimiento científico disponible.

Con esto, sostengo que los análisis de riesgo deben ser complementados con procesos que evalúen la calidad del conocimiento empleado por medio de deliberaciones que involucren diferentes disciplinas científicas, acciones o miembros del público. Mientras que diferentes disciplinas de la comunidad científica pueden debatir temas como la solidez metodológica y las interpretaciones alternativas para estudios científicos específicos, el resto de la comunidad podría deliberar sobre aspectos tales como las metas de protección relevantes y los criterios de valoración ambiental para cualquier evaluación y el peso que debería darse a los diferentes tipos de estudios. Un proceso de deliberación más amplio permite que sea probada la fortaleza y la calidad de cualquier evidencia para la toma de decisiones explorando los diferentes modos en los que puede ser enmarcada o interpretada por gente en diferentes contextos, con diferentes conocimientos y perspectivas, así como el nivel de apoyo con el que cuentan diferentes elecciones y supuestos en diversas comunidades. El enfoque de la ‘evaluación de pedigrí’ constituye una herramienta establecida para llevar a cabo dichos procesos.

### **EVALUACIÓN DE PEDIGRÍ**

El concepto de “pedigrís” científicos para el quehacer político fue propuesto por primera vez por Funtowicz y Ravetz (1990). La herramienta de la evaluación de pedigrís tiene por objeto hacer explícitas las diferentes opciones valorativas y los supuestos involucrados en el desarrollo del conocimiento y abrirlos a una evaluación deliberativa. Los pedigrís buscan proporcionar “una evaluación del proceso de producción de información (va Der Sluijs *et al*, 2005)”, con el supuesto de que una identificación y negociación transparentes de las diferentes elecciones y supuestos involucrados, pueden “aumentar la calidad y fortaleza del conocimiento utilizado en el quehacer político” (Craye, Funtowicz y van der Sluijs, 2005). En la primera instancia, los pedigrís de conocimiento se ocupan de identificar los ‘aspectos cruciales’ en la producción de conocimiento científico, por ejemplo, esos lugares donde son realizadas las elecciones

y definidos los supuestos. Estos aspectos clave incluyen cosas como: de qué modo es definido un problema científico, qué método se elige para realizar la investigación, qué criterios de valoración e indicadores son utilizados, qué herramientas estadísticas son aplicadas, cómo son interpretados los resultados, qué tipo de revisión se realiza y cómo son comunicados los resultados. Idealmente, se desarrollan un conjunto de cuestionamientos críticos y una escala cualitativa y cuantitativa para cada uno de esos aspectos clave. Por ejemplo, si se está interesado en entender los efectos negativos en la salud de un organismo, un aspecto clave será la elección de indicadores (qué es lo que se va a medir para determinar un efecto), qué implica, por ejemplo, una elección entre medir muertes observables, el número de tumores, conteo de glóbulos blancos, fortaleza de las uñas, entre otros.

Una pregunta clave puede ser ¿en qué medida el indicador seleccionado cubre el efecto del cual uno desea obtener conocimientos? Una escala cualitativa puede progresar de una medida exacta, bien ajustada, bien correlacionada, a una escala débilmente correlacionada, donde la fortaleza de las uñas puede ser considerada como una correlación débil y las muertes consideradas como la medida exacta. El pedigrí es el resultado de una matriz de evaluaciones de conocimiento basada en un ranking cualitativo de diferentes aspectos clave (que se presenta en una gama de formas, véase, por ejemplo Funtowicz y Ravetz, 1990; van der Sluijs et al 2005; Wickson, 2009). Al seleccionar aspectos clave, preguntas críticas y escalas cualitativas, y al llevar a cabo la evaluación, el énfasis es generalmente puesto en la negociación en grupos de trabajo que involucran a una serie de actores (*stakeholders*), especialmente aquellos con diferentes perspectivas, valores e intereses. Obviamente, el desarrollo de un pedigrí de conocimiento usualmente involucra diferentes niveles de debate y discusión, y esta es la parte de su utilidad; el proceso permite reconocer la importancia de las opciones valorativas y de los supuestos en la ciencia para el quehacer político de tal suerte que ésta última aparentemente se haga por impugnación. Asimismo, posibilita considerar sin sentido alguno evaluar y discutir tales valores y supuestos desde diferentes perspectivas. De este modo, “se abre” el proceso al hacer claro el impacto de diversas perspectivas en lugar de “cerrarlo” al tratar de otorgar un base objetiva para la toma de decisiones.

### *Evaluación tecnológica*

La evaluación tecnológica es un enfoque que está específicamente avocado a identificar los impactos sociales potenciales y las implicaciones de las nuevas tecnologías. Mientras el concepto y la práctica han sido utilizados por décadas, desarrollos recientes en el campo han buscado alterar la estructura y los objetivos de los enfoques previos. Por ejemplo, en su versión original, la evaluación tecnológica tomaba a la tecnología como algo dado, su objetivo era particularmente predecir los impactos sociales, y era un proceso orientado a dar información a los hacedores de políticas. En los nuevos enfoques, no obstante, se le otorga mucho más peso a la idea de coproducción entre ciencia y sociedad. La meta específica, entonces, es la de integrar de modo más directo la investigación en ciencias sociales y los valores públicos en los procesos de IyD. Los dos ejemplos más conocidos de este enfoque son las evaluaciones de tecnología constructivas y las evaluaciones de tecnología en tiempo real.

### EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA CONSTRUCTIVA

La evaluación de tecnología constructiva (CTA por sus siglas en inglés) ha sido ampliamente desarrollada en Holanda, siendo Arie Rip el promotor más visible de este enfoque. La CTA comienza como una creencia en la coproducción de ciencia y sociedad y está particularmente enfocada en la construcción de tecnologías con el objeto de ampliar el diseño de nuevas tecnologías de modo que los aspectos sociales sean explícitamente tomados en cuenta como criterios de diseño importantes (Scot y Rip, 1997). El foco está puesto específicamente en la modelación a través de la interacción entre actores sociales y tecnológicos. En este sentido, la idea es que los desarrolladores de tecnología modifiquen sus diseños de acuerdo con criterios sociales, probando nuevos enfoques, comprometiéndose en diálogos de base amplia, modificando los diseños futuros si es requerido y probándolos de nuevo y así sucesivamente. Mientras los procesos y herramientas actualmente utilizados pueden ser múltiples, existen tres elementos básicos considerados como clave en los enfoques CTA (*Ibid.*). Estos son: 1) un proceso de “mapeo socio-técnico” en el cual las dinámicas del desarrollo tecnológico son mapeadas en combinación con visiones y preferencias sociales; 2) experimentación temprana y controlada con tecnologías para identificar impactos inesperados y permitir la modulación en el diseño; 3) el diálogo entre los innovadores y un gama de accionistas de modo que las necesidades sociales y las demandas tengan oportunidad de ayudar en la modelación de procesos de innovación. La CTA ya ha sido aplicada a nanoST por medio del trabajo de Rip y sus colegas en Holanda (Rip, 2008).

### EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍA EN TIEMPO REAL

Las evaluaciones de tecnología en tiempo real (RTTA, por sus siglas en inglés) han sido desarrolladas en un inicio por Daev Guston y Daniel Sarewitz en Estados Unidos. La RTTA toma el mismo punto de partida general que la CTA, a saber, una creencia en la coproducción entre ciencia y sociedad y la necesidad de comprometerla directamente en el proceso de IyD. No obstante, la RTTA no se involucra en experimentación y prefiere focalizarse en situar la nueva tecnología en un contexto histórico, así como mapear el modo en que el conocimiento, los valores y las percepciones van cambiando a lo largo del tiempo (Guston y Sarewitz, 2002). La RTTA se asume como novedosa en el modo en que reúne e integra una serie de enfoques establecidos, métodos e intereses presentes en las ciencias sociales. Al hacer esto, se organiza alrededor de cuatro actividades que se apoyan mutuamente y que deben ser desarrolladas al mismo tiempo. Los cuatro componentes interrelacionados de la RTTA son: 1) los casos de estudio analógicos (donde son investigados aquellos ejemplos relevantes de innovaciones pasadas para entender el patrón de la resupuesta societal; 2) mapeo de programas de investigación (donde se mapean y monitorean actividades actuales de IyD para entender cómo se está haciendo, qué se está haciendo y dónde); 3) comunicación y advertencia temprana (donde los estudios son desarrollados para entender la representación en los medios, las actitudes públicas y las respuestas a las representaciones en los medios, estudiando de este modo, cómo cambian a lo largo del tiempo el conocimiento y las opiniones públicas) y, 4) evaluación tecnológica y elección (prever impactos societales potenciales, desarrollar y deliberar sobre diferentes escenarios futuros, y evaluar el impacto de actividades de RTTA en investigación y desarrollo) (*Ibid.*). Guston y Sarewitz están trabajando actualmente con una serie de colaborado-

res en Estados Unidos para implementar actividades del tipo RTTA en nanoST (véase: <http://cns.asu.edu/program/research.html>).

### *Evaluaciones Alternativas*

Los enfoques mencionados van mucho más allá del riesgo y permiten, al menos en cierta medida, la consideración directa de aspectos y discusiones sobre diferentes futuros socio-técnicos. No obstante, éstos se focalizan en analizar una tecnología particular, más que en el análisis de cómo el impacto y el conocimiento vinculados a esta tecnología pueden compararse con alternativas disponibles. Idealmente, si se considera apoyar el desarrollo de la nanoST, deberíamos preguntarnos cuáles son las rutas alternativas para alcanzar los mismos objetivos que buscan las nanotecnologías y cómo se comparan todas las alternativas en cuestiones sociales, ambientales y éticas.

El análisis multicriterio es una herramienta que ayuda a la toma de decisiones, que analiza las nuevas tecnologías de acuerdo con diferentes criterios y lo hace de modo que permite realizar una comparación entre una serie de opciones de políticas. Como las metodologías de evaluación tecnológicas, el enfoque multicriterio ha sido desarrollado y usado por muchos años y al igual que la evaluación de tecnología, recientemente han sido planteadas nuevas formas para responder a críticas orientadas a los viejos enfoques. Para la evaluación multicriterio, uno de los enfoques más significativos es el del mapeo multicriterio.

### **MAPEO MULTICRITERIO**

El mapeo multicriterio (MCM, por sus siglas en inglés) es un método desarrollado por Andy Stirling en el Reino Unido. Su objetivo específico es documentar las opiniones de los actores involucrados (*stakeholders*) en una serie de diversas opciones políticas de un modo tal que los diferentes criterios de evaluación, intereses y valores sobre los que se basan sus decisiones, queden claros. De este modo, busca “abrir” los enfoques de evaluación mapeando una serie de opciones alternativas disponibles y mostrando el modo en que estas alternativas son evaluadas por diferentes conocimientos, marcos y valores (Stirling, 2009 en: [www.multicriteriamapping.org](http://www.multicriteriamapping.org)). El MCM comparte las cuatro etapas básicas del análisis multicriterio. Estas son: 1) caracterizar una serie de “opciones” alternativas disponibles para alcanzar una meta particular; 2) desarrollar un conjunto de “criterios” relevantes para evaluar diferentes opciones; 3) evaluar cada opción por medio de la asignación de la “puntuación” numérica para su rendimiento de acuerdo con cada criterio; 4) asignar un “peso” a cada criterio para reflejar su importancia relativa para los actores involucrados (Stirling, Lobstein y Millstone, 2007). En términos prácticos, el MCM involucra a investigadores que desarrollan una serie de opciones alternativas disponibles para alcanzar un objetivo particular e identificar un grupo significativo y diverso de actores. Las entrevistas con estos actores se orientan a identificar el criterio de evaluación así como el rango de los diferentes tipos de opción de acuerdo con este criterio, asignando peso a este criterio y revisando y modificando los resultados cuando así se requiere. Esta información es grabada e ingresada en tiempo real en un software específicamente desarrollado (MC Mapper). En contraste con muchos enfoques multicriterio, no obstante, el MCM permite a los actores involucrados (y no sólo a los investigadores) agregar y redefinir las diferentes opciones que se les han presentado y definir el criterio de autoevaluación. Además,

el MCM es el único con un enfoque que permite captar también las incertidumbres. Esto se lleva a cabo haciendo que los actores realicen dos puntuaciones de rendimiento para cada criterio –es decir, cómo es el rendimiento para cada criterio particular, bajo supuestos tanto optimistas como pesimistas. Esto permite que las puntuaciones de rendimiento puedan presentarse como una serie de valores, lo que muestra la variación de acuerdo con el nivel de incertidumbre que se considera involucrada. A diferencia de otros enfoques multicriterio, MCM no está focalizado en llegar a una sola opción de ‘mejor rendimiento’, sino más bien, en constituir una herramienta que permita explorar un ‘mapeo’ de las diferencias en opciones de rendimiento. De tal modo, se busca abrir las discusiones de quehacer político por medio de explorar una serie de opciones diferentes de acuerdo con valores que varían, en lugar de simplemente cerrar la discusión al buscar desarrollar un único consenso sobre la mejor opción (*Ibid.*).

### *Compromiso público*

Uno de los enfoques importantes para evaluar nanoST de acuerdo con criterios sociales y éticos y en oposición al simple uso de criterios técnicos ha sido el desarrollo de ejercicios de “involucramiento desde arriba” (*upstream engagement*) (Wilsdon, 2005). No obstante, muchos de estos ejercicios para la discusión e inclusión social que se están llevando a cabo actualmente al rededor de los avances en nanoST (como las conferencias de consenso, jurados ciudadanos, grupos focales, cafés científicos, etc.) sólo requieren que las personas den sus opiniones en nanoST después de haber considerado los riesgos y beneficios involucrados o los escenarios hipotéticos futuros (Delgado, Kjolberg y Wickson, 2010). En estos enfoques, el desarrollo y avance de la nanoST es por lo tanto, esencialmente tomado como algo dado y las discusiones están orientadas a entender qué es lo que se considera aceptable de modo tal que se evite una reacción similar a la que ocurrió en contra de los GMOs (Doubleday, 2007). Plantear ejercicios de compromiso focalizados en nanoST de este modo, implica que aquellos involucrados en el debate necesitan estar bien informados sobre detalles técnicos relativos a lo que son las nanoSTy los riesgos potenciales que pueden implicar (antes de acudir al ejercicio o a través de información brindada en los primeros pasos del proceso). Esto no sólo crea desafíos en cuanto a encontrar los participantes adecuados y en cuanto a enmarcar cualquier información provista de un modo imparcial, sino que también reduce dramáticamente el alcance de las discusiones, es decir, a cómo deseáramos que sea nuestro futuro nanotecnológico, más que si queremos o no un futuro nanotecnológico.

No obstante, otra forma de enfocar las discusiones, sería la de comenzar preguntando a las personas qué es importante para ellas, qué consideran que es ‘la buena vida’, cómo comprenden el ‘progreso’, qué tipo de futuro les gustaría vivir, etc., y qué consideren la deseabilidad y el rol potencial de la nanoST en el marco de estas visiones y valores. Este enfoque estructura el proceso de compromiso y deliberación pública alrededor de discusiones de valores fundamentales más que sobre una tecnología específica *per se* y que compromete a la gente, en tanto ciudadanos de comunidades sociales y biológicas, en lugar de considerarlos como meros consumidores o *stakeholders* autointeresados. Este enfoque pondría en el primer plano de la discusión, las metas sociales y los valores éticos, antes que a la nanoST.

## CONCLUSIÓN

En este artículo sugerí que el discurso del riesgo domina la discusión pública y la toma de decisiones políticas en lo que refiere a las nuevas tecnologías. Al subrayar algunos de los numerosos elementos sociales que son descuidados en las discusiones técnicas de riesgo, he buscado mostrar la limitada y estrecha naturaleza de este discurso. Después consideré el caso de las nanociencias y nanotecnologías y describí no sólo algunos de los importantes aspectos de riesgo involucrados, sino también las enormes incertidumbres que obstaculizan nuestra capacidad para llevar a cabo evaluaciones de riesgo científicas en este campo. También sugerí que algunas de las cuestiones éticas son descuidadas cuando se retoman los análisis del riesgo desde un solo enfoque.

Habiendo criticado la naturaleza estrecha y tecnocrática de las evaluaciones de riesgo como una herramienta para la toma de decisiones (así como nuestra capacidad para aplicarla a la nanoST), después esquematicé una serie de herramientas alternativas disponibles que se enfocan de modo más específico en integrar consideraciones sociales y técnicas y abiertas a la consideración de múltiples futuros potenciales. Esto incluyó la descripción de diferentes formas de evaluación de conocimiento (es decir, evaluación de pedigrí), evaluación tecnológica (evaluación constructiva de la tecnología y evaluación de tecnología en tiempo real), y evaluaciones de alternativas (mapeo multicriterio). También consideré lo que significaría pensar con más detalle sobre los beneficios involucrados en el avance tecnológico y su relación con los valores éticos y sociales. De este modo, espero haber alentado un cambio, más allá de la simple discusión de los riesgos asociados a las nuevas tecnologías, al tiempo que éstas se confían a nosotros y son abiertas a un enfoque que busca una discusión social más amplia, incluyente y éticamente sensible como fundamento de la gobernanza de las nanotecnologías.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adams, J. (1995). *Risk*. Londres: University College London Press.
- Adams, J. y M. Thompson. (2002). "Taking account of societal concerns about risk: Framing the problem". *Health and Safety Executive*. Londres: 1-43.
- Anónimo. (2007). "Call for a moratorium on nanotechnology". *Sydney Morning Herald*, 17 de marzo. <<http://www.smh.com.au/news/National/Call-for-moratorium-on-nanotechnology/2007/03/17/1174080202836.html>> (último acceso 22 de julio de 2009)
- Balbus, J. M., A. D. Maynard, V. L. Colvin, V. Castranova, G. P. Daston, R. A. Denison, K. L. Dreher, P. L. Goering, A. M. Goldberg, K. M. Kulinowski, N. A. Monteiro-Riviere, G. Oberdörster, G. S. Omenn, K. E. Pinkerton, K. S. Ramos, K. M. Rest, J. B. Sass, E. K. Silbergeld y B. A. Wong. (2007). "Meeting report: Hazard assessment for nanoparticles—Report from an interdisciplinary workshop". *Environmental Health Perspectives*, 115:11, pp. 1654–1659.
- Baun, A., S. N. Sørensen, R. F. Rasmussen, N. B. Hartmann y C. B. Koch. (2008). "Toxicity and bioaccumulation of xenobiotic organic compounds in the presence of aqueous suspensions of aggregates of nano-C60". *Aquatic Toxicology*, 86: 379–387.
- BCC Research, "Carbon nanotubes: Technologies and commercial prospects". *BCC Report*, marzo de 2007. <<http://www.bccresearch.com/report/NAN024C.html>> (último acceso 21 de julio de 20).

- Beck, U. (1986). *Risk Society: Towards a New Modernity*. Londres: Thousand Oaks, Nueva Delhi, SAGE Publications.
- Bergamaschi, E. (2009). "Occupational exposure to nanomaterials: Present knowledge and future development". *Nanotoxicology*, 3(3): 194–201.
- Bürigi, B. R. (2006). "Societal implications of nanoscience and nanotechnology in developing countries". *Current Science*, 90(5): 645–658.
- Choi, J-W., G. Ramachandran y M. Kandlikar. (2009). "The impact of toxicity testing costs on nanomaterial regulation". *Environmental Science and Technology*, 43(9): 3030–3034.
- Craye, M., S. Funtowicz, y J. van der Sluijs. (2005). "A reflexive approach to dealing with uncertainties in environmental health risk science and policy". *International Journal of Risk Assessment and Management*, 5(2/3/4): 216-236.
- Delgado, A., K.L. Kjølberg y F. Wickson. (2010). "Public engagement coming of age: From theory to practice in STS encounters with nanotechnology". *Public Understanding of Science*.
- Donaldson, K., R. Aitken, L. Tran, V. Stone, R. Duffin, G. Forrest y A. Alexander. (2006). "Carbon nanotubes: A review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety". *Toxicological Sciences*, 92(1): 5–22.
- Doubleday, R. (2007). "Risk, public engagement and reflexivity: Alternative framings of the public dimensions of nanotechnology". *Health, Risk and Society*, 9(2): 211-227.
- Douglas, M. y A. Wildavsky. (1982). *Risk and culture: An essay on the selection of technical and environmental dangers*. Berkeley, University of California Press.
- Editor. (2008). "The same old story" (editorial). *Nature Nanotechnology*, 3(12): 699–700.
- EFSA. (2009). "The potential risks arising from nanoscience and nanotechnologies on food and feed safety" (scientific opinion of the Scientific Committee). *The EFSA Journal*, 958: 1–39. <[http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific\\_Opinion/sc\\_op\\_ej958\\_nano\\_en.pdf?ssbinary=true](http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific_Opinion/sc_op_ej958_nano_en.pdf?ssbinary=true)> (ultimo acceso 21 de julio de 2009).
- ETC Group. (2009). *Nanotechnology*. <<http://www.etcgroup.org/en/issues/nanotechnology.html>> (ultimo acceso 22 de julio de 2009).
- European Commission. (2008). *Recommendation on a code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research*. Brussels: European Commission. <[http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/nanocode-rec\\_pe0894c\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/nanocode-rec_pe0894c_en.pdf)> (ultimo acceso 23 de julio de 2009).
- Felt, U. y B. Wynne. (2007). *Taking european knowledge society seriously*. E. Commission, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities: 1-95.
- Felt, U. y B. Wynne. (2007). *Taking european knowledge society seriously*. Report of the Expert Group on Science and Governance to the Science, Economy and Society Directorate, Directorate-General for Research. Luxembourg: European Commission,
- Friends of the Earth Australia. (2006). *Nanomaterials, sunscreens and cosmetics: Small ingredients, big risks*. <<http://nano.foe.org.au/node/100>> (último acceso 22 de julio de 2009).
- Funtowicz, S. O. y J. R. Ravetz. (1990). *Uncertainty and Quality in Science for Policy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Funtowicz, S. O. y J. R. Ravetz. (1993). "Science for the post-normal age". *Futures*, 25(7): 739-755.
- Funtowicz, S. O. y J. R. Ravetz. (1993). "Science for the post-normal age". *Futures*, 25(7): 739–755.

- Grieger, K. D., S. Hansen y A. Baun. (2009). "The known unknowns of nanomaterials: Describing and characterising uncertainty within environmental, health and safety risks". *Nanotoxicology*: pp. 1–12. <<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a912823263>> (ultimo acceso 21 de julio de 2009)
- Guston, D. y D. Sarewitz. (2002). «Real-time technology assessment». *Technology in Society*, 24: 93-109.
- Handy, R. D. y R. Owen. (2008). "The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: current status, knowledge gaps, challenges and future needs". *Ecotoxicology*, 17: 315–325.
- Harding, R. (1998). *Environmental Decision-making: the roles of scientists, engineers and the public*. Sydney: The Federation Press.
- Kandlikar, M., G. Ramachandran, A. Maynard y B. Murdock. (2007). "Health risk assessment for nanoparticles: A case for using expert judgement2. *Journal of Nanoparticle Research*, 9, pp.137–156.
- Lam, C-W, J. T. James, R. McCluskey y R. L. Hunter. (2004). "Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation". *Toxicological Sciences*, 77, pp. 126–134.
- Lockman, P. L., J. M. Koziara, R. J. Mumper y D. D. Allen. (2004). "Nanoparticle surface charges alter blood-brain barrier integrity and permeability". *Journal of Drug Targeting*, 12(9–10): 635–641.
- Lucas, C. (2003). "We must not be blinded by science". *The Guardian*, 12 de junio. <<http://www.guardian.co.uk/politics/2003/jun/12/nanotechnology.science>> (último acceso 22 de julio de 2009).
- Ma-Hock, L., S. Treumann, V. Strauss, S. Brill, F. Luizi, M. Mertler, W. Wiench, A. O. Gamer, B. van Ravenzwaay y R. Landsiedel. (2009). "Inhalation toxicity of multi-wall carbon nanotubes in rats exposed for three months". *Toxicological Sciences*, <<http://toxsci.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/kfp146>> (último acceso 20 de julio de 2009)
- Maynard, A., P. A. Baron, M. Foley, A. A. Shedova, E. R. Kisin y V. Castranova. (2004). "Exposure to carbon nanotube material: Aerosol release during the handling of unrefined single-walled carbon nanotube material". *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 67(1): 87–107.
- Muller, J., F. Huaux, N. Moreau, P. Misson, J-F. Heilier, M. Delos, M. Arras, A. Fonseca, J. B. Nagy y D. Lison. (2005). "Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes". *Toxicology and Applied Pharmacology*, 207: 221–231.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2010). *Current Intelligence Bulletin: Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers* <<http://www.cdc.gov/niosh/docket/review/docket161A/>> (ultimo acceso 13 de diciembre de 2010).
- Oberdörster, E. (2004). "Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass". *Environmental Health Perspectives*, 112(10): 1058–1062.
- Oberdörster, G., E. Oberdörster y J. Oberdörster. (2005). "Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultra fine particles". *Environmental Health Perspectives*, 113(7): 824–839.
- Otway, H. (1980). The perception of technological risks: A psychological perspective. En M. Dierkes, S. Edward y R. Coppock. *Technological risk: Its perception and handling in the european community*. Cambridge: CEC Oelgeschlager, Gunn and Hain: 35-44.

- Otway, H. (1987). "Experts, risk communication and democracy". *Risk Analysis*, 7(2): 125-129.
- Owen, R., R. Handy. (2007). "Formulating the problems for environmental risk assessment of nanomaterials". *Environmental Science and Technology*, 15 de agosto: 5582-5588.
- Poland, C. A., R. Duffin, I. Kinloch, A. Maynard, W. A. H. Wallace, A. Seaton, V. Stone, S. Brown, W. MacNee y K. Donaldson. (2008). "Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study". *Nature Nanotechnology*, 3: 423-428.
- Rip, A. (2008). "Nanoscience and nanotechnologies: Bridging gaps through constructive technology assessment". En G. Hirsch Hadorn, H. Hoffmann-Riem, S. Biber-Klemm, W. Grossenbacher-Mansuy, D. Joye, C. Pohl, U. Wiesmann y E. Zemp (eds.). *Handbook of transdisciplinary research*. Springer: 145-158.
- Robins, R. (2002). "The Realness of Risk: Gene Technology in Germany." *Social Studies of Science*, 32(1): 7-35.
- Royal Commission on Environmental Pollution. (2008). *Novel materials in the environment: The case of nanotechnology*. Norwich: The Stationery Office.
- Royal Society & the Royal Academy of Engineering. (2004). *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*. Londres: Royal Society. <<http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>> (último acceso 21 de julio de 2009).
- Sanchez, V.C., J.R. Pietruska, N.R. Miselis, R.H. Hurt y A.B. Kane. (2009). "Biopersistence and potential adverse health impacts of fibrous nanomaterials: what have we learned from asbestos". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and nanobiotechnology*. 1(5): 511-529.
- Scenihr. (2005). "The appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies", opinion adopted during the 7th plenary meeting, 28-29 de septiembre de 2005, European Commission, Health & Consumer Protection Directorate General, 2006. <[http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihr/docs/scenihr\\_o\\_003b.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_003b.pdf)> (ultimo acceso 21 de julio de 2009).
- Schummer, J. (2007). "The global institutionalisation of nanotechnology research: A bibliometric approach to the assessment of science policy". *Scientometrics*, 70(3): 669-692.
- Schwarz, M. y M. Thompson (1990). *Divided We Stand: Redefining Politics, Technology and Social Choice*. Hemel Hempstead, Harvester Wheatsheaf.
- Scot, J. y A. Rip. (1997). "The Past and Future of Constructive Technology Assessment" *Technological Forecasting and Social Change* 54:2/3, pp. 251-268.
- Shedova, A. A., E. R. Kisin, R. Mercer, A. R. Murray, J. L. Johnson, A. I. Potapovich, Y. Y. Tyurina, O. Gorelik, S. Arepalli, D. Schwegler-Berry, A. F. Hubbs, J. Antonini, D. E. Evans, B-K. Ku, D. Ramsey, A. Maynard, V. E. Kagan, V. Castranova y P. Baron. (2005). "Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice". *American Journal of Physiology—Lung Cellular and Molecular Physiology*, 289: L698-L708.
- Shedova, A., V. Castranova, E. Kisin, D. Schwegler-Berry, A. Murray, V. Gandelsman, A. Maynard y P. Baron. (2003). "Exposure to Carbon Nanotube Material: Assessment of Nanotube Cytotoxicity using Human Keratinocyte Cells". *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 66(20): 1909-1926.

- Slovic, P. (1987). "Perception of Risk". *Science*, 236: 280-285.
- Slovic, P. (1991). Beyond numbers: A broader perspective on risk perception and risk communication. En D. G. Mayo y R. D. Hollander (eds.). *Acceptable evidence: science and values in risk management*. Oxford: Oxford University Press: 48-65.
- Slovic, P. (1998). Perceived risk, trust and democracy. En R. E. Lofstedt y L. Frewer. *Earthscan reader in risk and modern society*. Londres: Earthscan Publications Ltd.: 181-192.
- Slovic, P., B. Fischhoff, S. Lichtenstein. (1982). "Why Study Risk Perception?". *Risk Analysis* 2(2): 83-93.
- Stirling, A. (1999a). "Risk at a turning point?" *Journal of Environmental Medicine*, 1: 119-126.
- Stirling, A. (2009). "Multicriteria Mapping". <<http://www.multicriteriamapping.org/>> (último acceso 28 de enero de 2009).
- Stirling, A. y D. Gee. (2002). «Science, precaution and practice». *Public Health Reports*, 117: 521-533.
- Stirling, A., T. Lobstein y E. Millstone. (2007). "Methodology for obtaining stakeholder assessments of obesity policy options in the PorGrow project". *Obesity reviews*, 8(Suppl. 2): 17-27.
- Takeda, K., K. Suzuki, A. Ishihara, M. Kubo-Irie, R. Fujimoto, M. Tabata, S. Oshio, Y. Nihei, T. Ihara y M. Sugamata. (2009). "Nanoparticles transferred from pregnant mice to their offspring can damage the genital and cranial nerve systems". *Journal of Health Science* 55(1): 95-102.
- Thompson, M., R. Ellis, A. Wildavsky. (1990). *Cultural theory*. Boulder, Colorado: Westview Press.
- Van Der Sluijs, J. P., M. Craye, S. Funtowicz, P. Kloprogge, J. Ravetz y J. Risbey. (2005). "Combining quantitative and qualitative measures of uncertainty in model-based environmental assessment: The NUSAP system". *Risk Analysis*, 25(2): 481-492.
- Walker, N.J. y J. R. Bucher. (2009). "A 21<sup>st</sup> century paradigm for evaluating the health hazards of nanoscale materials?". *Toxicological Sciences*, 110(2): 251-254.
- Warheit, D. B., B. R. Laurence, K. L. Reed, D. H. Roach, G. A. M Reynolds y T. R. Webb. (2004). "Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats". *Toxicological Sciences*, 77: 117-125.
- Washington DC: Woodrow Wilson International Center for Scholars: 22-29.
- Wickson, F. (2009). "Reliability rating and reflective questioning: A case study of extended review on Australia's risk assessment of Bt Cotton". *Journal of Risk Research*, 12(6): 749-770.
- Wickson, F., A. Delgado y K.L. Kjølberg. (2010). "Who or what is 'The Public'?". *Nature Nanotechnology*, 5: 757-758.
- Wilsdon, J. (2005). "Paddling upstream: New currents in european technology assessment". En M. Rodemeyer, D. Sarewitz y J. Wilsdon (eds.). *The future of technology assessment*.
- Wynne, B. (1992). "Uncertainty and environmental learning: reconceiving science and policy in the preventive paradigm". *Global Environmental Change*, 2(2): 111-127.
- Wynne, B. (2001). "Creating public alienation: Expert cultures of risk and ethics on GMOs". *Science as Culture*, 10(4): 445-481.
- <sup>4</sup>Zhu, L., D.W.Chang, L. Dai, y Y. Hong. (2007). "DNA damage induced by multiwalled carbon nanotubes in mouse embryonic stem cells". *Nano Letters*, 7(12): 3592-3597.