

Parte A

Definiciones y consideraciones generales sobre las tecnologías transformativas y convergentes: el caso de la nanotecnología

1. Las tecnologías convergentes

Las “tecnologías convergentes” se refieren a la combinación sinérgica (en dúos, tríos o cuartetos) de cuatro áreas de la ciencia y la tecnología (las tecnologías transformativas, NBIC), cada una de las cuales está progresando a un acelerado ritmo: (a) nanociencia y nanotecnología; (b) biotecnología y biomedicina, incluyendo la ingeniería genética; (c) tecnología de la información, incluyendo comunicación y computación avanzada y (d) ciencias cognitivas, incluyendo la neurociencia cognitiva (ver Cuadro 1). En Europa⁴ se caracteriza a las tecnologías convergentes como la unión de tecnologías y sistemas de conocimiento que se combinan con el fin de buscar una meta en común.

De Cozar (2003) señala que no existe una separación muy marcada entre la nanociencia y la nanotecnología, ya que la diferencia entre la generación de conocimiento que persigue la nanociencia y lo que serían sus aplicaciones tecnológicas está emparentada con las transformaciones experimentadas por la actividad científica durante los últimos cincuenta años. De Cozar explica que la nanociencia y la nanotecnología son un ejemplo perfecto de la interacción entre el conocimiento científico, especialmente el suministrado por la física cuántica, y un conjunto complejo de innovaciones tecnológicas, comenzando por los propios microscopios de última generación que se emplean para el estudio de los objetos de ese tamaño. Por ello propone el término “nanotecnociencia” para referirse a la investigación y desarrollo a escala nanométrica, independientemente de quien los conduce, científicos, ingenieros o tecnólogos.

4 Nordmann (2004)

Cuadro 1
Definiciones de tecnologías transformativas

1 nanómetro = 10^{-9} metros = 0.000000001 metros

Nanociencia: El estudio de fenómenos y de la manipulación de materiales, en escalas atómicas, moleculares y macromoleculares, donde las características o propiedades se diferencian significativamente de estas en una escala más grande.

Nanotecnología: El diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, artefactos y sistemas por medio del control de la forma y tamaño en la escala nanométrica.

Biotechnología: Toda aplicación tecnológica que utiliza sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos.

Ingeniería genética: Proceso mediante el cual se transfiere el gen de un organismo a otro a través de la manipulación de la información genética (genes)

Tecnologías de la información y comunicación: El conjunto de tecnologías y sistemas necesarios para gestionar la información, y especialmente las computadoras y programas necesarios para convertirla, almacenarla, administrarla, transmitirla y encontrarla. Incluye la computación avanzada.

Robótica. La tecnología que se enfoca en la construcción de máquinas dirigidas por computadoras, capaces de desarrollar una gran variedad de tareas.

Ciencia cognitiva: El estudio científico de la mente humana. Su enfoque y área de investigación es marcadamente multidisciplinario, fruto de la confluencia entre la lingüística, la psicología cognitiva, la neurociencia, la filosofía de la ciencia y la inteligencia artificial.

Fuente: elaboración propia

Existen otras formas de caracterizar la convergencia. Bill Joy, científico principal de Sun Microsystems, ha favorecido la convergencia entre la genética, la nanotecnología y la robótica. Otros autores prefieren llamarlas GRAIN (genética-robótica-inteligencia artificial-nanotecnología). Cualquiera sea el acrónimo, sin embargo, el punto crítico de las tecnologías convergentes es que todas ellas se encuentran en "el fondo"⁵.

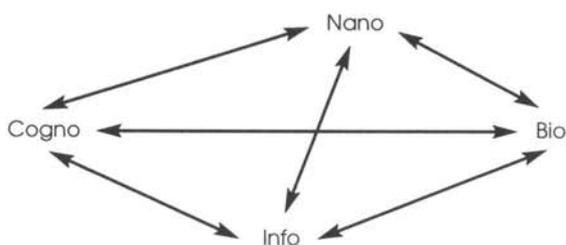
5 Feynman (1959)

Lo que está detrás de las tecnologías convergentes⁶ es la idea de fusionar tecnologías estratégicas en la nanoescala; la meta es combinar la biotecnología, las tecnologías de la información y comunicación y las ciencias cognitivas, con tecnologías al nivel atómico, aplicadas a diferentes sectores, como por ejemplo la agricultura, la salud, los materiales, la defensa y el cerebro humano. Se puede entonces señalar que las tecnologías convergentes constituyen la combinación del conocimiento para la manipulación de la materia viva con la inerte (ETC, 2003). Esta combinación tiene como objetivo final impactar directamente sobre sectores estructurales de la economía, la política, la sociedad y el medio ambiente.

El Gráfico 1 muestra el tetraedro NBIC, que simboliza la mencionada convergencia. Cada campo está representado por un vértice, cada par de campos por una línea, cada conjunto de tres por una superficie y la unión completa de los cuatro campos por el volumen del tetraedro⁷.

Para examinar los futuros desarrollos y oportunidades de aplicación de las tecnologías convergentes, la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF) de los Estados Unidos realizó en 2002 un taller de trabajo en el cual fueron identificadas cinco grandes áreas⁸.

Gráfico 1: Tetraedro NBIC



Fuente: elaboración propia.

6 Goncalves (2006)

7 Rocco y Bainbridge (2002)

8 Roco y Bainbridge (2002)

1.1. Expandiendo la cognición humana y la comunicación

Un examen de las necesidades y oportunidades en las áreas de las funciones cognitivas y de percepción humana y de la comunicación entre individuos y máquinas programadas con características similares a las humanas, muestran cómo las tecnologías convergentes podrían mejorar el conocimiento y uso efectivo de las habilidades mentales del ser humano. Se identificaron cinco campos en los cuales la convergencia tecnológica sería particularmente importante. La más alta prioridad fue otorgada al Proyecto del Cognomen Humano, una propuesta de esfuerzo multidisciplinario para comprender la estructura, funciones y mejora potencial de la mente humana. Los otros cuatro campos prioritarios señalados fueron "artefactos de interfase personales sensoriales", "comunidad enriquecida mediante la tecnología", "aprendiendo como aprender" e "instrumentos mejorados para la creatividad".

1.2. Mejorando la salud humana y las capacidades físicas

Un enfoque sobre las habilidades físicas del individuo muestra lo esencial de un entendimiento científico comprensivo de los procesos químicos y biológicos fundamentales. Se busca el control del metabolismo en las células, tejidos, órganos y organismos. La conversión directa de señales biomoleculares y códigos neuronales utilizables en motores hecho por el individuo abrirá oportunidades a un control directo del cerebro por la vía de la ingeniería neuromórfica. Seis capacidades tecnológicas para la mejora de la salud humana y el desempeño físico recibieron alta prioridad: máquinas nano-bio para el desarrollo de tratamientos, incluyendo aquellos resultantes de la bioinformática, genómica y proteómica; implantes basados en la nanotecnología para sustituir órganos humanos o para monitorear el bienestar fisiológico; robots en la nanoescala e instrumentos no obstructivos comparables para intervención médica; extensión de interfases cerebro-a-cerebro y cerebro-a-máquina utilizando conexiones al sistema neuronal humano; plataformas multimodos para personas con deficiencias de visión y oído; y ambientes virtuales para el entrenamiento, diseño y formas de trabajo no limitadas por distancias o la escala física sobre el cual se ejecuta.

1.3. Mejorando el desempeño grupal y de la sociedad

Las implicaciones de la convergencia tecnológica en el comportamiento social humano, la cognición social, las relaciones interpersonales, los procesos de grupo, el

uso del lenguaje, el aprendizaje en ambientes formales y no formales y los correlatos psicofisiológicos del comportamiento social, son muy amplias. Una gama de beneficios posibles ha sido identificada y una visión específica ha sido propuesta sobre cómo estos beneficios podrían ser alcanzados mediante una investigación enfocada a un sistema que se denominó "El Comunicador". Esta tecnología NBIC podría superar las barreras que en materia de comunicaciones son ocasionadas por impedimentos físicos, diferencias de lenguaje, distancia geográfica y variaciones en conocimiento. De esta manera se mejora la efectividad de la cooperación en los colegios, corporaciones, agencias de gobierno y a través del mundo. Tecnologías convergentes promoverán nuevas industrias revolucionarias, productos y servicios basados sobre la sinergia y la integración de la biología, la información y las ciencias cognitivas a partir de la nanoescala.

1.4. Seguridad nacional

Un examen de la radicalmente cambiante naturaleza de conflictos en este nuevo siglo y las oportunidades de fortalecer la defensa permitió identificar siete metas altamente diversas: interconexión de datos y anticipación de peligros; vehículos de combate no habitados; evacuación y entrenamiento para el combate; respuestas a amenazas químicas, biológicas, radiológicas y explosivas; sistemas de combate; tratamientos sin uso de droga para mejorar el desempeño humano; exoesqueletos para el aumento del desempeño físico; prevención del daño cerebral ocasionado por la falta de sueño; y aplicaciones de la interfase cerebro-máquina.

1.5. Unificación de la ciencia y la educación

Un examen de las oportunidades para la unificación de la ciencia y la actual educación científica muestra que la última está pobremente diseñada para enfrentar los nacientes desafíos. Se documentó la necesidad de una transformación radical en la educación de la ciencia desde la escuela primaria hasta el entrenamiento de postgrado. Se espera que parte de las futuras respuestas venga de la convergencia de las tecnologías NBIC mismas, las que ofrecen valiosos instrumentos nuevos y modalidades de educación.

Es claro también que la convergencia de las disciplinas científicas y campos tecnológicos anteriormente separados no podrá tener lugar sin la emergencia de nuevo tipo de personal que comprenda con profundidad campos múltiples y pueda trabajar

inteligentemente para integrarlos. Serán necesarios nuevos currículos, nuevos conceptos para proveer coherencia intelectual y nuevos tipos de instituciones educativas.

Gracias a su enorme potencial, varios países o grupos de países han avanzado en la formulación de propuestas para desarrollar intensamente las tecnologías convergentes. En el caso de los Estados Unidos, los resultados del taller antes citado han dado lugar al programa "Convergencia NBIC: tecnologías convergentes para mejorar el desempeño humano". En Canadá, la convergencia está representada por una "síntesis de bio-sistémica", y en Europa se habla de las "tecnologías convergentes para la sociedad europea del conocimiento".

La investigación pública y privada sobre las tecnologías convergentes está desarrollándose a pasos gigantescos, y por el momento fuera del control de las regulaciones de los gobiernos o del escrutinio de la sociedad civil, a pesar de existir programas y proyectos gubernamentales. Es particularmente importante que tanto los gobiernos como la sociedad civil tengan una comprensión y ejerzan un monitoreo, o los productos de las tecnologías convergentes serán trasladados al mercado en procesos poco transparentes y democráticos de revisión, evaluación y regulación". Este marco es particularmente relevante a los objetivos planteados en el "Proyecto de tecnologías convergentes en los países andinos".

2. Nanociencia y nanotecnología

2.1. Convergencia y nanotecnología

En el presente Proyecto se ha buscado con mayor énfasis el análisis de la situación de la nanociencia y la nanotecnología⁹, toda vez que la convergencia de las tecnologías transformativas se basa fundamentalmente en la unidad material en la nanoescala y sobre la integración tecnológica a partir de ella. En la escala nanométrica, la materia manifiesta, en ocasiones, propiedades diferentes a las tradicionalmente conocidas a escala macroscópica. El aprovechamiento de estas propiedades en la implementación de dispositivos, en la formación de nuevos materiales, en sus métodos de manufactura

9 ETC (2003)

10 En el Informe se utilizará el término nanotecnología para incluir también a la nanociencia, a menos que la separación de los dos términos se haga necesaria en algún momento específico.

y en su producción, es tan sólo uno de los propósitos de este paradigma emergente que transformará a las sociedades en el curso de las próximas décadas. Este nuevo ámbito del conocimiento ha resultado en un sinnúmero de posibilidades tecnológicas.

La ciencia puede ahora comprender la forma cómo se combinan los átomos para formar moléculas complejas, y cómo éstas a su vez se agregan de acuerdo con los principios comunes fundamentales para formar estructuras tanto orgánicas como inorgánicas. La tecnología puede dominar procesos naturales para construir nuevos materiales, productos biológicos y máquinas desde la nanoescala hasta la escala métrica. Los mismos principios permitirán comprender, cuando sea aconsejable, y controlar el comportamiento tanto de microsistemas complejos, como neuronas y componentes de computadoras, como de macrosistemas, tales como el metabolismo humano y vehículos de transporte.

En la visión de Nordmann (2004), el paradigma de la convergencia se ha modificado con la llegada de la nanotecnología, ya que sólo ella crea una única convergencia de dominios, es decir que todas las cosas están compuestas de moléculas que pueden, a través de la nanoescala, reconstruir toda la materia, prácticamente de nuevo.

2.2. Nanotecnología: desarrollo y potencial

Se espera que la nanotecnología sea la tecnología transformativa de este siglo, por su capacidad de reconstruir sustancias familiares o para crear nuevos materiales y productos con propiedades y funciones también nuevas. La nanotecnología reestructurará fundamentalmente las tecnologías actualmente en uso para la manufactura, la medicina, la defensa, la producción de la energía, la gestión ambiental, el transporte, las comunicaciones, la computación y la educación¹¹. Las aplicaciones en nanotecnología no solamente van a penetrar y permear prácticamente todos los sectores productivos, sino acompañarán también cambios en los ámbitos social, económico, ético y ecológico.

La nanotecnología ha adquirido un papel estratégico en el concierto de tecnologías convergentes. El número creciente de publicaciones, programas de formación, centros de investigación y producción industrial, así como los montos presupuestales cada vez

¹¹ Roco *et al.* (2000)

más significativos, dan cuenta del importante papel que está jugando el avance tecnológico en escala nanométrica para trazar el camino por el que transitará la sociedad del siglo XXI. En el 2002, más de 300 universidades en 29 países, 500 compañías públicas y privadas y 100 firmas de inversión se encontraban vinculadas con proyectos en nanociencias y nanotecnologías (SFCG, 2002). Asimismo, alrededor de 10,000 millones de dólares se invierten en investigación y desarrollo¹².

En 2004 se reportaron más de 1,500 compañías involucradas en proyectos de investigación y desarrollo relacionados con tecnologías a escala nanométrica¹³. Importantes instituciones, como la National Nanotechnology Initiative (NNI), han estimado que para el 2015 su impacto podrá haber disparado estos indicadores y haber generado nuevas oportunidades industriales por un monto cercano a mil millones de dólares¹⁴. Se calcula que en 2004 ya estaban en el mercado productos que incorporaron nanotecnología por un valor de 13,000 millones de dólares.

Solamente en sus aplicaciones ambientales, hasta el año 2010 se prevé que el valor en el mercado alcanzará 6,000 millones de dólares, con un crecimiento anual de 75.2 por ciento. El mercado mayor será el de la remediación ambiental, seguido por la protección, el mantenimiento y las mejoras. Se prevé también que, una vez que la seguridad y comportamiento de estas tecnologías sean verificados, habrá un radical aumento en la demanda, guiada por la necesidad de remediar cursos de agua y océanos, el aire urbano y en general la calidad ambiental global, así como la infiltración de suelos y aguas subterráneas por sustancias tóxicas¹⁵.

Para apreciar la velocidad de introducción de innovaciones en el mercado, se puede señalar que solamente en 2005 la oficina de patentes de los Estados Unidos concedió 4,996 patentes, y a partir de entonces el número ha ido creciendo en un 4 por ciento anual; además, las solicitudes también lo están haciendo en un 25 por ciento. En una revisión de 2,600 patentes, se encontró que 52,148 de sus reivindicaciones cubrían por lo menos siete categorías de aplicación¹⁶.

12 Rejeski (2005)

13 Lux Research (2004)

14 Roco y Bainbridge (2001)

15 Meridian Nano and Development News, March 16, 2006.

16 *Ibid.*

En el marco de las aplicaciones, se han identificado cuatro generaciones superpuestas de productos y procesos de nanotecnología con potencial de desarrollo en el lapso 2000-2020¹⁷:

a) Nanoestructuras pasivas:

- Nanoestructuras dispersas y de contacto (aerosoles y coloides).
- Productos que incorporan nanoestructuras (revestimientos, compuestos reforzados por nanopartículas, metales nanoestructurados, polímeros y cerámicas).

b) Nanoestructuras activas (con función evolutiva):

- Con efectos sobre la salud, bio-activos (drogas "en el blanco", bioartefactos).
- Estructuras adaptativas físico-químicas activas (transistores de 3D, amplificadores y actuarios).

c) Nanosistemas integrados:

- Manufactura asistida, redes de 3D y nuevas arquitecturas jerárquicas, robótica y bio-sistemas evolucionarios.

d) Nanosistemas moleculares heterogéneos:

- Artefactos moleculares por diseño, diseño atómico y funciones emergentes.

Cada generación de productos está marcada por la creación de prototipos comerciales que usan el control sistemático de los respectivos fenómenos y procesos de manufactura. Los productos pueden también incluir componentes que corresponden a diferentes generaciones. Se espera que las actuales capacidades rudimentarias de la nanotecnología para el control y la manufactura en la nanoescala evolucionen significativamente tanto en complejidad como en el grado de integración hacia el 2020.

En este último caso, después del 2015, el campo se habrá expandido para incluir nanosistemas moleculares y redes heterogéneas dentro de las cuales estructuras moleculares y supramoleculares servirán como artefactos distintivos. Las proteínas dentro de las células funcionan de esta manera, pero mientras que los sistemas biológicos son de base acuosa y marcadamente sensitivos a la temperatura, los nanosistemas moleculares serán capaces de operar en un rango muy grande de ambientes y ser más rápidos; computadoras y robots podrán ser reducidos a tamaños extraordinariamente pequeños. Las aplicaciones médicas pueden ser cada vez más ambiciosas a medida que se establezcan nuevos tipos de terapia genética y tratamiento antienviejimiento. Nuevas

¹⁷ Roco (2004)

interfases que conecten a la gente directamente con la electrónica pueden cambiar las telecomunicaciones.

Como reflejo de las características específicas de la nanotecnología, los programas de investigación y desarrollo (I+D) establecidos durante los últimos cinco años en el ámbito internacional se han vuelto muy integradores, envolviendo a múltiples agencias de financiamiento. Por ejemplo, la estrategia de la NNI de los Estados Unidos, anunciada en el año 2000, se basa en la planificación a largo plazo, la inclusión de potenciales contribuyentes, el establecimiento de asociaciones estratégicas multidisciplinarias entre el gobierno, la industria y las organizaciones internacionales, y el apoyo a los estudios de la dimensión social desde el comienzo. Se han establecido muchos programas nacionales o multinacionales que reflejan la necesidad de desarrollo multidisciplinario y multiámbito de la nanotecnología.

Un ejemplo de lo anterior es el Séptimo Programa Marco de la Unión Europea, que contiene un conjunto de actividades de cooperación en torno a la nanotecnología con un presupuesto de 3,500 millones de euros, además de recursos que provendrán del presupuesto (7,500 millones de euros) para la investigación básica del Consejo Europeo de Investigaciones, creado recientemente.

En el marco de las actividades previstas en Europa, el Sexto Programa Marco de la Unión Europea incluyó entre sus actividades la realización del Nanoforum Europa-Latinoamérica¹⁸, destinado a estimular la colaboración en I+D y la producción entre organizaciones dedicadas a la nanotecnología. El programa financia estancias de investigadores latinoamericanos en cuatro países europeos (Países Bajos, Francia, Alemania y España). Para el 2007, se ha previsto la realización de un foro sobre nanotecnología en ocasión del XVI Congreso Internacional de Investigaciones en Materiales, a realizarse en Cancún, México, en agosto. Con miras al 2008, se ha previsto la realización de talleres sobre prioridades de investigación conjunta en Brasil.

Al mismo tiempo que se han señalado las oportunidades actuales y futuras de las tecnologías convergentes, y en particular de la nanotecnología, se alerta también de sus impactos negativos, en particular su desarrollo como una forma de manipulación de las economías y sociedades que se encuentren en desventaja al no tenerlas

18 www.nanoforumeu.eu

desarrolladas, ampliando de esta manera mucho más la brecha de pobreza y desigualdad entre los países¹⁹.

Un estudio del grupo ETC (2003) anota que las relaciones económicas y sociales entre los países del Norte y del Sur pueden verse afectadas aun más, por ejemplo con la introducción de nuevos materiales basados en textiles mejores que el algodón, lo que afectaría la producción de un número muy grande de países. Precisamente sobre el impacto de la nanotecnología y los “*commodities*”, el “Diálogo global sobre nanotecnología y los pobres”, promovido por el Instituto Meridian de los Estados Unidos, sostuvo un taller de trabajo en Río de Janeiro entre el 29 y 31 de mayo de 2007.

En el punto tres se discutirán algunas cuestiones de riesgo que plantea el desarrollo y la utilización de la nanotecnología, como la base principal de la convergencia. Es conveniente señalar acá que, a pesar de estas alertas, parece que los enfoques de gobernabilidad del riesgo específicos a la nanotecnología se están quedando atrás, y hay una percepción de que la velocidad actual y el alcance de la I + D excede a la capacidad de los reguladores que evalúan su impacto humano y ambiental²⁰.

2.3. Nanotecnología y sus aplicaciones en países en desarrollo

La nanotecnología puede ser dominada para atender muchos de los problemas más críticos del desarrollo, y en los últimos años varios han sido los esfuerzos para sistematizar mejor estas posibles contribuciones. Destacan entre ellos los trabajos de la Universidad de Toronto y el Programa Canadiense sobre Genómica y Salud Global, del Instituto Meridian de los Estados Unidos, de la Unión Europea (encuentro LA-UE) y otros.

En el primer caso, el Centro de Bioética de la Universidad de Toronto y el Programa de Genómica y Salud Global de Canadá identificaron, a través de una encuesta Delfi, las diez más importantes aplicaciones (Salamanca-Buentello *et al.* 2005). El Cuadro 2 recoge el resultado de este trabajo. Se debe notar que la encuesta fue hecha a 85 especialistas tanto de países en desarrollo (60 por ciento) como desarrollados (40 por ciento), y la pregunta cerró las opciones de respuesta a aplicaciones en seis áreas: agua, agricultura, nutrición, salud, energía y ambiente.

19 Goncalves (2006)

20 Vessuri y Sánchez (2007)

Cuadro 2
Correlación entre las diez aplicaciones principales de la nanotecnología para países en desarrollo y las Metas del Milenio

Posición (puntaje)	Aplicaciones de nanotecnología	Ejemplos	MDM*
1 (766)	Almacenamiento de energía. Producción y conversión	Sistemas nuevos de almacenamiento de hidrógeno basados en nanotubos y otros nanomateriales livianos. Celdas fotovoltaicas y emisores orgánicos de luz basados en puntos cuánticos. Nanotubos de carbón en capas de película compuesta para celdas solares. Membranas biomiméticas híbridas, proteínas- polímeros Zeolitas nanoporosas para lanzamiento lento y eficiente de dosis de agua y fertilizantes para plantas y de nutrientes y drogas para el ganado.	VII
2 (706)	Mejora de la productividad agrícola	Nanocápsulas para lanzamiento de herbicidas. Nanosensores para la calidad de los suelos y para monitoreo de la salud vegetal. Nanomagnetos para remoción de contaminantes de suelos.	I,IV,V,VII
3 (682)	Tratamiento y remediación de agua	Nanomembranas para purificación de agua, desalinización, y detoxificación. Nanosensores para la detección de contaminantes y patógenos. Zeolitas nanoporosas, polímeros nanoporosos, y arcillas attapulgita para purificación de aguas	I,IV,V,VII
4 (606)	Diagnóstico de enfermedades y monitoreo	Sistemas nanolitro (lab-sobre-chip). Dispositivos de nanosensores basados en nanotubos de carbón. Puntos cuánticos para diagnóstico de enfermedades. Nanopartículas magnéticas como nanosensores. Conjugados dendrímeros-anticuerpos para diagnóstico de SIDA y cáncer. Nanosensores de nanocables y nanocorreas para diagnóstico de enfermedades. Nanopartículas como engrandecedores de imágenes médicas.	IV,V,VI
5 (558)	Sistemas de lanzamiento de drogas	Nanocápsulas, liposomas, dendrímeros, "buckyballs", nanobiomagnetos y arcillas attapulgita para sistemas lentos de lanzamiento de drogas.	IV,V,VI

Continúa

Posición (puntaje)	Aplicaciones de nanotecnología	Ejemplos	MDM*
6 (472)	Procesamiento y almacenaje de alimentos	Nanocompuestos para capas de cubierta plásticas utilizadas en el empaque de alimentos. Nanoemulsiones antimicrobiales para aplicaciones en la decontaminación de equipos de alimentos, empaques o alimentos. Biosensores de detección de antígenos de base nanotecnológica para la identificación de contaminación por patógenos.	I,IV,V
7 (410)	Contaminación del aire y remediación	Degradación fotocatalítica en base de nanopartículas de TiO ₂ de contaminantes de aire en sistemas de auto limpieza. Nanocatalizadores para convertidores catalíticos más eficientes, baratos y mejor controlados. Nanosensores para la detección de materiales tóxicos y escapes. Nanoartefactos para la separación de gases.	IV,V,VII
8 (366)	Construcción	Estructuras nanomoleculares para la producción de asfaltos y concreto más resistentes al efecto de las aguas. Nanomateriales resistentes al calor para bloquear radiación ultravioleta e infrarroja. Nanomateriales para viviendas más baratas y durables, capas de superficie, colas, concreto, y exclusión de luz y calor. Superficies auto limpiables (e.g. ventanas, espejos, tazas) con capas bioactivas.	VII
9 (321)	Monitoreo de la salud	Nanotubos y nanopartículas para glucosa, CO ₂ , y sensores de colesterol y para monitoreo <i>in-situ</i> de homeostasis.	IV,V,VI
10 (258)	Detección y control de vectores y pestes	Nanosensores para detección de pestes. Nanopartículas para nuevos pesticidas, insecticidas y repelentes de insectos.	IV,V,VI

Notas: MDM: Metas de Desarrollo del Milenio

Fuente: Salamanca-Buentello *et al.* (2005)

Por su parte, el Instituto Meridian de los Estados Unidos adoptó un enfoque diferente, al elegir directamente ciertos sectores de mayor potencial de aplicación y convocando a especialistas en nanotecnología, en desarrollo de políticas públicas y académicos, a diálogos en talleres de trabajo. El primero de ellos, ejecutado en Chennai, India, en octubre de 2006, trató sobre aplicaciones al agua. El Taller discutió sobre la base de estudios previamente elaborados (Hillie *et al.*, 2006; Meridian, 2006) e identificó un conjunto de instrumentos y artefactos que ya incorporan nanotecnología y están en el mercado o que están en un estado avanzado de desarrollo, los mismos que son:

- Membranas para nanofiltración, incluyendo tecnologías de desalinización
- Arcillas attapulgita, zeolitas y filtros de polímeros
- Nanocatalizadores
- Nanopartículas magnéticas
- Nanosensores para la detección de contaminantes

En la comparación entre técnicas tradicionales y de base nanotecnológica, se encuentra que muchas de las primeras son efectivas para remover bacterias, virus, turbidez y otros contaminantes del agua, que son relativamente de bajo costo y pueden ser producidas localmente. Una revisión de sus aplicaciones revela también que existen muchos desafíos técnicos con referencia a costos y efectividad de remoción de ciertos contaminantes de una manera que vaya al encuentro de las necesidades de los pobres, y en estos casos las aplicaciones de base nanotecnológica representan un potencial muy importante.

En el mismo enfoque, el Instituto convocó a un nuevo taller entre el 29 y 31 de mayo de 2007, en Río de Janeiro, Brasil, para examinar las aplicaciones e impactos de la nanotecnología sobre los "commodities" de los países en desarrollo. Para muchos de estos países, estos productos constituyen el eje de su economía. De un total de 141 países en desarrollo, 95 de ellos dependen de sus "commodities" para al menos el 50 por ciento de sus ingresos por exportaciones²¹.

21 CFC (2005)

Las oportunidades potenciales de la nanotecnología sobre los “*commodities*” incluyen²²:

- Opciones de bajo riesgo para moverse hacia arriba en la cadena de valor al incrementar las exportaciones de “*commodities*” y productos primarios con aditivos nanotecnológicos, recubrimientos o procesos.
- Mayor energía, insumos, y/o eficiencia del trabajo, u otros métodos mejorados de producción.
- Nuevos mercados para materiales de base nanotecnológica y productos que utilizan “*commodities*”.
- Nuevos y más amplios mercados industriales y comerciales para la exportación de “*commodities*” y productos primarios.

Los riesgos potenciales incluyen, pero no se limitan, a:

- Disminución de la demanda global de “*commodities*” y productos primarios exportables debido a la presencia de nuevos nanomateriales y productos facilitados por la nanotecnología, que pueden funcionar como sustitutos con igual o mejor comportamiento a precios comparables.
- Disminución de la demanda global para “*commodities*” de exportación debido a nanotecnologías que incrementan la potencia de pequeñas cantidades de materiales de “*commodities*” o que aumentan la longevidad de los mismos.
- Aumento en la oferta global de “*commodities*” de exportación y/o pérdida de ventajas comparativas debido a los procesos de producción basados en la nanotecnología, que permitan una producción más barata, localizada y/o irrestricta de los mismos.

Sobre la base de una clasificación de los avances y aplicaciones más significativos de la nanotecnología en el corto y mediano plazo (ver Cuadro 3), se dirigió una limitada consulta a un pequeño grupo de 10 expertos (7 en Colombia, 2 en Bolivia y 1 en Perú), que permitió clasificar los avances más importantes esperados para los países andinos. El mismo señala los resultados obtenidos.

A pesar del pequeño tamaño de la muestra, se considera que las indicaciones de los expertos pueden representar una visión sobre el impacto de la nanotecnología en los países de la región andina. Por otro lado, aunque la consulta no fue hecha en Venezuela

22 GDNP (2007)

de la misma forma que en Colombia, Perú y Bolivia, el grupo de científicos venezolano que revisó el formulario y fue consultado sobre los desarrollos allí definidos ha coincidido en señalar una variedad de aplicaciones prioritarias referidas a la convergencia nano-bio en aplicaciones para la salud, el sector petrolero, agua y celdas solares para aplicaciones energéticas; y la inscripción de datos para sistemas de comunicación.

Cuadro 3
Avances y aplicaciones más significativos de la nanotecnología

Desafío 1. Alcanzar las necesidades energéticas globales con soluciones limpias y mejorar la eficiencia energética

- 1 Almacenamiento, producción y conversión de energía. Celdas solares y de combustible; almacenamiento y conversión de hidrógeno; membranas húmedas auto reparables para almacenamiento de energía; aplicaciones y artefactos fotónicos.
- 2 Incremento de la eficiencia de equipos eléctricos, químicos y mecánicos. Fullerenos como lubricantes; máquinas, artefactos y manufactura molecular; nanomateriales para el aislamiento térmico y eléctrico y la reducción de la fricción y el desgaste; ingeniería molecular de materiales

Desafío 2. Proveer globalmente abundante agua limpia

- 3 Tratamiento y mejoramiento del agua. Nanosensores para la detección de contaminantes y patógenos; nanomembranas y arcillas para la desalinización y remoción de compuestos tóxicos; nanomagnetos para la remoción de compuestos radioactivos

Desafío 3. Aumentar la salud y la longevidad de la vida humana

- 4 Diagnóstico y control de enfermedades. Laboratorio-sobre-chip; puntos cuánticos para la biodetección y bioanálisis; pruebas y secuenciamiento de ADN para propósitos humanos, veterinarios y agricultura; artefactos para la detección de patógenos; amplificador de imágenes médicas; etiquetas moleculares ópticas y magnéticas
- 5 Sistemas de transporte de drogas. Nanocápsulas; liposomas; dendrímeros; "buckyballs" para entrega de drogas y vacunas; sistemas de entrega de drogas lentos y sostenibles
- 6 Aplicaciones de la investigación de la genómica y proteómica. Nanosensores basados en ADN; marcadores genéticos; sistemas de secuenciamiento y detección de ADN; dendrímeros para ingeniería genética; sistemas eficientes para expresión genética
- 7 Monitoreo de la salud. Nanotubos para sensores de glucosa; monitoreo *in situ* de homeostasis

- 8 Agentes terapéuticos nuevos. Nanomateriales para separación de drogas; dendrímeros como agentes de adhesión; varios agentes microbicidas; artefactos para la separación de drogas; formulaciones para aumentar el incremento de vida de los contenedores de drogas

Desafío 4. Reparar y preservar el medio ambiente y mejorar la eficiencia de la agricultura

- 9 Transplante y reparación de órganos y tejidos. Nanomateriales para vendas de transplante y reparación de órganos y tejidos; sangre artificial; prótesis incluyendo recursos visuales y auditivos
- 10 Mejoramiento del aire. Artefactos para la separación de gases; nanorevestimientos para la fotocatalisis de contaminantes aéreos y para la reducción de emisiones de combustibles fósiles; nanosensores para materiales tóxicos y fugas
- 11 Mejoramiento de la agricultura. Nanocápsulas para la propagación de herbicidas; sistemas de liberación de agua y nutrientes lentos; nanosensores de calidad de suelos; nanosensores para salud vegetal; fertilizantes biodegradables; nanomagnetos para descontaminación de suelos
- 12 Procesamiento y almacenamiento de alimentos. Nanobiosensores para protección de empaque de alimentos; detección de patógenos y contaminantes; materiales nanobiológicos para mejor oferta; confiabilidad y productividad de alimentos
- 13 Detección y control de vectores y pestes. Nanosensores para la detección de pestes; nanopartículas para nuevos pesticidas, insecticidas y repelentes

Desafío 5. Hacer que la poderosa tecnología de la información esté disponible en todo lugar

- 14 Almacenamiento y procesamiento de datos. Nanotubos de carbón para transistores de un electrón; memoria, almacenamiento y procesamiento de ADN y óptica; pozos y puntos cuánticos; espintrónica; transistores con nanocables
- 15 Transmisión de datos. Nanocables; monocapas autoensambladas

Desafío 6. Permitir el desarrollo de nuevos materiales para diferentes usos incluyendo el dominio del espacio

- 16 Construcción. Nanomateriales para abaratar costos de vivienda; superficies; revestimientos; pegamentos; concretos; exclusión de luz y calor; superficies auto limpiables; revestimientos bioactivos
- 17 Nanofibras para textiles; dióxido de titanio esparcido sobre textiles.
- 18 Nanomateriales para la industria de automóviles.

Fuente: elaboración propia

Cuadro 4
Los diez avances y aplicaciones más significativos de
la nanotecnología para los países andinos

Posición	Avance
1	Tratamiento y mejoramiento del agua. Nanosensores para la detección de contaminantes y patógenos; nanomembranas y arcillas para la desalinización y remoción de compuestos tóxicos; nanomagnetos para la remoción de compuestos radioactivos
2	Transplante y reparación de órganos y tejidos. Nanomateriales para vendas de transplante y reparación de órganos y tejidos; sangre artificial; prótesis incluyendo recursos visuales y auditivos
3	Diagnóstico y control de enfermedades. Laboratorio-sobre-chip; puntos cuánticos para la biodetección y bioanálisis; pruebas y secuenciamiento de ADN para propósitos humanos, veterinarios y agricultura; artefactos para la detección de patógenos; amplificador de imágenes médicas; etiquetas moleculares ópticas y magnéticas
4	Incremento de la eficiencia de equipos eléctricos, químicos y mecánicos. Fullerenos como lubricantes; máquinas, artefactos y manufactura molecular; nanomateriales para el aislamiento térmico y eléctrico y la reducción de la fricción y el desgaste; ingeniería molecular de materiales
5	Almacenamiento, producción y conversión de energía. Celdas solares y de combustible; almacenamiento y conversión de hidrógeno; membranas húmedas auto reparables para almacenamiento de energía; aplicaciones y artefactos fotónicos.
6	Mejoramiento del aire. Artefactos para la separación de gases; nanorevestimientos para la fotocatalisis de contaminantes aéreos y para la reducción de emisiones de combustibles fósiles; nanosensores para materiales tóxicos y fugas
7	Almacenamiento y procesamiento de datos. Nanotubos de carbón para transistores de un electrón; memoria, almacenamiento y procesamiento de ADN y óptica; pozos y puntos cuánticos; espintrónica; transistores con nanocables
8	Transmisión de datos. Nanocables; monocapas autoensambladas
9	Mejoramiento de la agricultura. Nanocápsulas para la propagación de herbicidas; sistemas de liberación de agua y nutrientes lentos; nanosensores de calidad de suelos; nanosensores para salud vegetal; fertilizantes biodegradables; nanomagnetos para descontaminación de suelos
10	Sistemas de transporte de drogas. Nanocápsulas; liposomas; dendrímeros; "buckyballs" para entrega de drogas y vacunas; sistemas de entrega de drogas lentos y sostenibles

Fuente: elaboración propia.

3. Gobernabilidad y comunicación del riesgo en nanotecnología

3.1 Gobernabilidad²³

El concepto de gobernabilidad marca una diferencia importante respecto de la visión gubernamental tradicional, caracterizada ésta por un enfoque de tipo legislativo de arriba a abajo y que intenta regular el comportamiento de las personas e instituciones. La noción de gobernabilidad, en cambio, ve el proceso de gobernar como un esfuerzo conjunto de actores industriales, públicos y sociedad civil, usualmente dentro de redes, con el objetivo de hacer el mejor uso de sus respectivos recursos, habilidades y capacidades para alcanzar fines o propósitos específicos. La gobernabilidad incluye los procesos, convenciones e instituciones que determinan cómo se ejercita el poder en vistas de la gestión de los recursos y los intereses; cómo se toman decisiones y se resuelven conflictos importantes; cómo se organizan y estructuran las interacciones entre los actores claves en el campo; y cómo se desarrollan y movilizan los recursos, habilidades y capacidades para alcanzar resultados deseados por de interés acuerdan participar en estos procesos.

Mientras que el papel del gobierno continúa, los supuestos de la gobernabilidad subrayan el cambio desde considerar sólo al gobierno hasta tomar en cuenta la gobernabilidad en debates acerca de la modernización de sistemas de políticas, implicando una transición desde tipos de política o regulación restrictivas a tipos permisivos (por ej., del “garrote” a la “zanahoria”).

La consideración de la gobernabilidad más que del gobierno o la industria privada para evaluar y gestionar las implicaciones de la nanotecnología proporciona un cuadro más amplio y más realista acerca de las fuerzas que darán forma al futuro del desarrollo de la nanotecnología. En ella se presta especial énfasis a las instituciones privadas, en particular la industria, ya que el desarrollo y la aplicación tendrán lugar dentro del sector privado, cuidadosamente vigilado por reguladores, ONG’s y medios de masas.

3.2 El riesgo en nanotecnología

Sobre la base de diferentes estudios, Rejeski (2005) ha resumido los riesgos potenciales de la nanotecnología de la siguiente manera:

²³ Refiérase al documento de Vessuri y Sánchez (2007)

Toda vez que los nanomateriales construidos muestran comportamientos que dependen de su estructura física y química, los paradigmas de evaluación del riesgo que han sido desarrollados sobre la base de química global tradicional pueden no ser más válidos. Por ejemplo, la respuesta sobre la inhalación de partículas insolubles nano-estructuradas en los pulmones no es conocida. En general, no existe información disponible sobre el comportamiento de materiales nano-estructurados en el cuerpo. Partículas de diámetro nanométrico pueden ser eliminadas de los pulmones a través de rutas no convencionales y afectar otras partes del cuerpo, incluyendo el sistema cardiovascular, el hígado, los riñones y el cerebro. No se conoce casi nada sobre el impacto de los nanomateriales estructurados sobre estos órganos. Las partículas de diámetro nanométrico pueden ser capaces de penetrar la piel en algunos casos, aunque ésta es aún un área de investigación básica y las posibilidades de penetración son aparentemente mayores para la piel dañada. El potencial efecto que representan las partículas nanoestructuradas en cosméticos y otros productos de la piel puede no ser dañino, pero esto requiere de mayor estudio. Casi nada se conoce sobre el peligro de la ingesta vía aditivos alimentarios o por accidente de nanomateriales estructurados.

En fin, aunque una comprensión del impacto que tendría lanzar en el medio ambiente o el agua nanomateriales estructurados y productos de origen nano, es considerada crítica, virtualmente nada se conoce hasta el momento. Considerando esta situación, varios países y grupos de países están iniciando tareas de diálogo y definición de normas de control, monitoreo y regulación. Sin embargo, los recursos asignados a las tareas de investigación de los riesgos son aún escasos frente a aquéllos destinados a la investigación. Por ejemplo, a través de la "Iniciativa Nacional de Nanotecnología" de los Estados Unidos, el gobierno federal gasta alrededor de 1,000 millones de dólares anuales en I + D, y de este total menos del uno por ciento en el presupuesto de 2004 fue a la investigación de riesgos; en 2006 este porcentaje había subido apenas al 4 por ciento.

Entre las acciones emprendidas, destaca la creación en 2004 de un grupo de trabajo de la Agencia de Protección Ambiental (APA) de los Estados Unidos dirigido a identificar los retos que se debe encarar para proteger la salud humana y el ambiente. El grupo emitió su informe en diciembre de 2005, en el que discute los beneficios potenciales, define un plan para el manejo del riesgo, propone recomendaciones a la APA

para generar más investigación sobre las aplicaciones-implicaciones y convoca a ésta a desarrollar guías de productos “buenos” en varias de las industrias de nanotecnología (EPA-USA, 2005). En octubre de 2005, el Instituto Nacional de Salud Ocupacional de los Estados Unidos produjo un documento guía que describe las formas en los cuales pueden existir nanomateriales dañinos en el lugar de trabajo provee lineamientos para reducir exposiciones e identifica futuras necesidades de investigación²⁴.

Fuera de los Estados Unidos, en junio de 2005, la Comisión Europea adoptó un “Plan de acción” que define acciones que la Comisión Europea debe conducir e invita a los países miembros a ejecutar. En particular, identifica a la seguridad, la integración y la responsabilidad como factores cruciales para el exitoso desarrollo y utilización de la nanotecnología. Más aun, la Unión Europea ha encargado al Grupo de Ética en la Ciencia definir cuestiones éticas en la nanomedicina. En este marco, se espera la “inmediata implementación de una estrategia segura, integrada y responsable para las nanociencias y la nanotecnología”.

Por otra parte, algunas corporaciones transnacionales están desarrollando un sistema de prevención de riesgos propios. Es el caso de DuPont y la organización *Environmental Defense* (ED), que han propuesto un marco sobre el control de riesgos y prácticas de manejo de carácter voluntario destinado a guiar la industria, gobiernos, universidades y otras organizaciones, y que está siendo puesto a la consideración de la opinión pública y eventualmente de otras organizaciones de carácter regulatorio.

Frente a esta propuesta, una coalición de la sociedad civil y organizaciones de trabajadores han lanzado una carta abierta a la comunidad internacional de nanotecnología rechazando tal propuesta de marco voluntario, objetando a cualquier proceso en el cual la participación pública en el seguimiento gubernamental es “usurpado” por la industria y sus aliados. La misma carta señala que tal tipo de regulaciones voluntarias han retrasado o debilitado regulaciones necesarias y excluido la participación pública. La rápida comercialización de la nanotecnología requiere investigación centrada en el ambiente, la salud y la seguridad, una discusión abierta de los impactos sociales y una urgente y estrecha supervisión²⁵.

24 NIOSH (2005)

25 Meridian Nanotechnology and Development News, April 12, 2007.

Por otro lado, el “South Centre”²⁶, ha llamado la atención sobre la imposibilidad de evaluar las oportunidades y desafíos potenciales que la nanotecnología presenta a los países en desarrollo sin examinar el contexto más amplio de la transferencia de tecnología y de la propiedad intelectual. La cuestión del control y propiedad de la nanotecnología es vital para los países en desarrollo, una vez que una singular innovación en la escala nanométrica (materiales, artefactos y procesos) puede ser relevante para un sinnúmero de aplicaciones a través de todos los sectores industriales. Se señala que “las empresas que poseen patentes pioneras pueden potencialmente voltear industrias enteras”. La ingeniería en escala nanométrica provee nuevas oportunidades para el control monopólico de materia animada e inerte, y de esta manera la propiedad intelectual jugará un papel clave en decidir quién puede capturar el mercado del billón de dólares previsto para los próximos diez a quince años, quién ganará acceso a las tecnologías en la nanoescala y a qué precio, es decir que “las patentes pondrán una sombra más grande sobre la nanotecnología que sobre cualquier otra ciencia moderna en un estado comparable de desarrollo”.

3.3 Plataformas para involucrar a grupos de interés

Los métodos para involucrar a empresarios y responsables de políticas en debates anticipatorios acerca de las tecnologías transformativas no están bien desarrollados. Hay, sin embargo, estudios, como los que adelanta el *International Risk Governance Council* (IRGC)²⁷, que muestran oportunidades para estimular la innovación participativa en esta área y generar mejores plataformas para involucrar a grupos de interés.

Frente a la pregunta: ¿cómo se puede implementar el compromiso de los grupos de interés?, se ha planteado la conveniencia de distinguir entre incertidumbres simples, complejas y elevada incertidumbre y problemas de riesgos altamente inciertos, si bien, por supuesto, la categorización de los riesgos según su calidad y naturaleza de la información disponible puede ser controvertida entre los grupos de interés. Y frente a la pregunta ¿quién debe decidir si una cuestión de riesgo puede ser categorizada como simple, compleja, incierta o ambigua?, se ha planteado la posibilidad de que no se logre un consenso. En tales casos, sólo un análisis detallado de la peor eventualidad entre las posibilidades de monitoreo y vigilancia puede constituir el único compromiso alcan-

26 ETC (2005)

27 Renn y Roco (2006)

zable (remoción reversible de algunas fuentes de riesgo, detección oportuna de efectos adversos y fuerza de los sistemas de vigilancia, etc.).

El mejor medio de manejar este conflicto es involucrar a grupos de interés cuando se distribuyen los diferentes riesgos bajo cuatro categorías, como se discute a continuación.

3.3.1. Problemas de riesgos simples

Se debe considerar que los riesgos aparentemente simples a menudo resultan ser más complejos, inciertos o ambiguos de lo que se estimaba inicialmente. Por tanto, es esencial revisar esos riesgos regularmente y monitorear los logros con cuidado. Para emitir juicios sobre problemas de riesgos simples no se necesita un enfoque sofisticado que involucre a las partes afectadas. La mayoría de los actores ni siquiera tratarían de participar, ya que los resultados son más o menos obvios. (ver Cuadro 5)

Cuadro 5
Problemas de riesgos simples

Caracterización del conocimiento	Estrategia de gestión	Instrumentos apropiados	Participación de grupos de interés
Materiales naturalmente nanoestructurados, donde la composición química determina las propiedades	Basada en la rutina: (juicio de tolerancia/ aceptabilidad)	Aplicación de la toma de decisión tradicional: <ul style="list-style-type: none"> - Análisis de riesgo-beneficio - Trade-offs riesgo-riesgo - Ensayo y error - Estándares técnicos - Incentivos económicos - Educación, etiquetado, información - Acuerdos voluntarios 	Discurso instrumental

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Problemas de riesgos complejos asociados con componentes

El manejo adecuado de la complejidad en la evaluación y gestión del riesgo requiere transparencia sobre los juicios subjetivos y la inclusión de elementos de conocimiento que han dado forma a los parámetros en ambos lados de la ecuación costo-beneficio. En nanotecnología, la complejidad a menudo se refiere a cada componente, aunque el

sistema total en sí mismo puede estar bien definido. La resolución de la complejidad necesita un procedimiento discursivo durante la fase de evaluación, con un vínculo directo con el juicio de tolerancia, aceptabilidad y manejo de riesgo. Un discurso epistemológico dirigido a encontrar las mejores estimaciones para caracterizar los riesgos bajo consideración pudiera proporcionar insumos para manejar la complejidad. Este discurso pudiera inspirarse en diferentes campos científicos y la participación de expertos y vectores de conocimiento. Pueden provenir de la academia, el gobierno, la industria o la sociedad civil, pero su legitimidad para participar está en que ellos pueden traer conocimiento nuevo o adicional a la mesa de negociación. El objetivo es resolver conflictos cognitivos. Serían deseables ejercicios como Delphi, Grupo Delphi y talleres de consenso para servir a los objetivos de un discurso epistemológico (ver Cuadro 6).

Cuadro 6
Problemas de riesgos inducidos por la complejidad de los componentes

Caracterización del conocimiento	Estrategia de gestión	Instrumentos apropiados	Participación de grupos de interés
Nanoestructuras pasivas con nuevas propiedades y funciones para la misma composición química: Primera generación de nanoproductos	Informada en cuanto al riesgo (agente de riesgo y cadena)	Caracterización de la evidencia disponible: <ul style="list-style-type: none"> - Consenso experto en la búsqueda de instrumentos - Delphi o conferencia de consenso - Meta-análisis - Construcción de escenarios, etc. - Resultados alimentados en operaciones rutinarias. 	Discurso epistemológico
	Enfocada en la robustez: (sistema que absorbe el riesgo)	Mejoramiento de la capacidad de amortiguamiento de la meta de riesgo a través de: <ul style="list-style-type: none"> - Mecanismos adicionales de seguridad - Redundancia y diversidad en el diseño de mecanismos de seguridad - Mejora en la capacidad de manejo - Establecimiento de organizaciones de alta confiabilidad 	

Fuente: elaboración propia

3.3.3. Problemas de riesgo debido a cuestiones irresueltas de elevada incertidumbre

La caracterización de riesgos, la evaluación de riesgos y el diseño de opciones para la reducción de riesgos plantean desafíos especiales en situaciones de elevada incertidumbre acerca de las estimaciones de riesgo. ¿Cómo es que se puede juzgar la severidad de una situación cuando el daño potencial y su probabilidad se desconocen o son muy inciertas? En este dilema, los gestores del riesgo son asesorados para incluir a los principales grupos de interés en los procesos de evaluación, y se les pide encontrar un consenso sobre el margen extra de seguridad en el cual quisieran invertir, a cambio de evitar consecuencias potencialmente catastróficas (ver Cuadro7).

Cuadro 7
Problemas de riesgo inducidos por incertidumbres del sistema

Caracterización del conocimiento	Estrategia de gestión	Instrumentos apropiados	Participación de grupos de interés
Estructuras y nanosistemas activos	Basada en la precaución (agente de riesgo)	Uso de características azarosas como la persistencia, ubicuidad, etc., como aproximaciones en estimaciones de riesgo Los instrumentos incluyen: - Contención - Tan bajo como sea razonablemente alcanzable y posible - El mejor control de tecnología disponible, etc - Etc.	Discurso reflexivo
	Enfocada en la resiliencia (sistema que absorbe el riesgo)	Mejora en la capacidad de manejar sorpresas - Diversidad de medios para lograr beneficios deseados - Evitar la vulnerabilidad elevada - Permitir respuestas flexibles - Preparación para la adaptación	

Fuente: elaboración propia

Este tipo de deliberación, denominado discurso reflexivo, se apoya en un debate colectivo para equilibrar las posibilidades por la excesiva protección o subprotección. Si se busca excesiva protección, se pueden estancar las innovaciones; por el contrario, si se busca poca protección, se puede experimentar sorpresas desagradables. La cuestión clásica de cuán seguro es lo seguro es sustituida por la cuestión de cuánta incertidumbre e ignorancia los principales actores están dispuestos a aceptar a cambio de un beneficio dado. Es importante que los responsables de las políticas, de los principales grupos de interés y los científicos tomen parte en este tipo de discurso reflexivo, que puede tomar diferentes formas: mesas redondas, foros de espacios abiertos, ejercicios negociados para el establecimiento de reglas o comités de mediación o de asesoría mixta, incluyendo a científicos y otros grupos de interés.

3.3.4. Problemas de riesgo relacionados con elevada ambigüedad en la sociedad debido a desarrollos futuros desconocidos y diferencias en juicios de valor

Si un problema de riesgo está asociado a ambigüedades importantes, es insuficiente demostrar que los reguladores del riesgo están abiertos a las preocupaciones del público y a considerar las cuestiones que mucha gente desea que atiendan. En casos de ambigüedad elevada, el proceso de evaluación del riesgo necesita estar abierto al insumo público y a nuevas formas de deliberación. Esto comienza con revisar la cuestión del marco adecuado; ¿Es la cuestión realmente un problema de riesgo o es de hecho una cuestión de estilo de vida y visión futura?

El objetivo es encontrar consenso sobre las dimensiones de la ambigüedad que necesitan ser consideradas al comparar los riesgos y beneficios y hacer un balance de pros y contras. Ambigüedades elevadas requieren la estrategia más inclusiva de participación, ya que tanto los grupos directamente afectados como los que lo son indirectamente tienen algo que contribuir al debate. Resolver ambigüedades en debates de riesgo requiere de una plataforma participativa en la que argumentos competitivos, creencias y valores sean abiertamente discutidos. Los procesos deliberativos disponibles incluyen: paneles ciudadanos, jurados ciudadanos, conferencias de consenso, *ombudsmen*, comisiones asesoras ciudadanas y otros similares (ver Cuadro 8).

Cuadro 8
Problemas de riesgos inducidos por la ambigüedad

Caracterización del conocimiento	Estrategia de gestión	Instrumentos apropiados	Participación de grupos de interés
Desconocido; problemas de riesgos inducidos por la mayor ambigüedad	Basada en el discurso	Aplicación de métodos de resolución de conflictos para lograr el consenso o la tolerancia a los resultados de la evaluación de riesgo y la selección de opciones de gestión: <ul style="list-style-type: none"> - Integración de los grupos de interés en el logro del cierre del debate - Énfasis sobre la comunicación y el discurso social 	Discurso participativo

Fuente: elaboración propia