

EL PANORAMA DE LAS NANOTECNOLOGÍAS: UNA APROXIMACIÓN DESDE UNA FILOSOFÍA DE LA PRÁCTICA CIENTÍFICA

MARÍA ÁNGELES QUESADA
MARIANGELESQUESADA@YAHOO.ES
INSTITUTO DE FILOSOFÍA, CSIC

Resumen: Este texto se inscribe en una propuesta de análisis y clarificación de la noción de práctica científica impulsada por diversos autores (Buchwald, Collins, Galison, Hacking, Martínez, Echeverría,...). Explicaremos el giro praxiológico de la filosofía de la ciencia y tomaremos como punto de partida algunas de las aportaciones de sus autores. Esta contribución tratará de a) distinguir diversas cuestiones que deben ser abordadas para clarificar la noción de práctica científica y b) ofrecer un panorama general de los principales problemas de las nanotecnologías desde la perspectiva de un estudio de la práctica científica. Nos ocuparemos de los problemas conceptuales de las nanotecnologías, de su caracterización dentro de los *Converging Technologies* y la tecnociencia, de la nanometría, de las dificultades en el uso de instrumentos y del problema de la replicación. En última instancia, sostendremos que un estudio a fondo de las nanotecnologías proporcionará un conocimiento más sistemático y profundo acerca de la práctica científica, sus componentes principales, su interacción y, en definitiva, su dinámica interna.

Palabras clave: nanotecnologías, práctica científica, *Converging Technologies*

Abstract: The paper is framed within a proposal for the analysis and clarification of the notion of scientific practice promoted by several authors (Buchwald, Collins, Galison, Hacking, Martínez, Echeverría,...). We shall explain the praxiological shift of the philosophy of science and we shall take as starting point some of the contributions of its authors. This contribution is an attempt a) to distinguish several questions which are to be approached to clarify the notion of scientific practice and b) to offer a general view of the main problems of nanotechnology from the perspective of a study of scientific practice. We shall deal with the conceptual problems of nanotechnologies, with its characterization within *Converging Technologies* projects and technoscience, with nanometrology, with difficulties in the uses of instruments and with the replication problem. Finally, we shall claim that a thorough study of nanotechnologies will provide a more systematic and deep knowledge of scientific practice, its main components, its interactions and its internal dynamic.

Key words: nanotechnologies, scientific action, *Converging Technologies*

1.- Introducción.

Las nanotecnologías tienen una presencia creciente en las investigaciones de científicos e ingenieros, que comienzan a ser capaces de manipular y construir el mundo subatómico. En los últimos años, han pasado a ser líneas prioritarias en las políticas científicas de la Unión Europea y comienzan a despertar el interés de la opinión pública en general y, por supuesto, de las reflexiones filosóficas. En un espacio corto de tiempo proliferan los artículos acerca de los impactos sociales de los logros nanotecnológicos, sus riesgos y consecuencias, la política científica empleada en su gestión, las consideraciones metafísicas subyacentes a la manipulación atómica y otros, los menos, que apuntan a los problemas epistemológicos derivados de las nanotecnologías.

Estamos en plena gestación de la nanotecnologías a nivel científico y tecnológico. La filosofía de la tecnología encuentra así un nuevo ámbito de estudio, en particular a la hora de caracterizar esta nueva *main stream* tecnocientífica dentro de los programas de investigación norteamericano y europeo denominados *Converging*

Technologies (tecnologías capacitadoras, convergentes...) ¹, de su inclusión dentro de la tecnociencia y de su novedad y complejidad (se habla de *virgin* o *greensite status* ²). Este conjunto de problemas pone de relieve las principales características y problemas de la práctica científica actual. Este artículo pretende ser una primera contribución al estudio de las nanotecnologías desde la perspectiva de la filosofía de la práctica tecnocientífica.

2.- Filosofía de la práctica tecnocientífica.

En los últimos veinte años del pasado siglo se ha ido gestando un giro hacia una filosofía de la práctica científica. En la actualidad, sus principales responsables son historiadores, filósofos y sociólogos de la ciencia como Galison, Pickering, Hacking, Franklin, Collins..., que nos han ofrecido estudios de las prácticas científicas centrados fundamentalmente en la física del siglo XX. No obstante, como algunos de ellos reconocen, el término comienza a utilizarse por doquier y sin un significado preciso ³. Considerando a las nanotecnologías y los macroproyectos *Converging Technologies* como un caso paradigmático de la ciencia del siglo XXI, esta contribución tratará de:

- 1) Distinguir diversas cuestiones que deben ser abordadas para clarificar la noción de práctica científica,
- 2) ofrecer un panorama general de los principales problemas de las nanotecnologías desde la perspectiva de un estudio de la práctica científica.

Como hipótesis de partida asumimos algunas de las aportaciones recientes de historiadores, sociólogos y filósofos de la ciencia al debate sobre las prácticas en la ciencia. En primer lugar, el giro praxiológico de la filosofía de la ciencia, que se resume muy bien en la ya célebre frase de Hacking, “los experimentos tienen vida propia” ⁴, desplazó el interés filosófico hacia los experimentos y los instrumentos científicos, reivindicando su importancia con respecto a las teorías. En los últimos años, esta corriente se ha ido desarrollando y precisando. Hacking señala como foco principal de interés las interacciones entre los elementos de la práctica, a saber: experimentadores, experimentos, aparatos, teorías... ⁵. También Galison habla de la *trading zone* o zona de intercambio y comunicación de las diferentes subculturas de la ciencia (de experimentalistas, instrumentalistas, teóricos...) ⁶. Por lo tanto, el nuevo ámbito de estudio filosófico es la práctica científica en sí misma, esto es, cuestiones tales como los científicos, experimentadores, experimentos, instrumentos, aparatos, teorías, conocimiento tácito... En segundo lugar, la práctica científica es compleja e incluye agentes humanos y agentes no humanos (materiales y sociales). En la interacción entre

¹ M. C. Roco, y W. S. Bainbridge, (eds) *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Arlington, VA, USA: National Science Foundation, 2001, y A. Nordmann *Converging Technologies – Shaping the future of European Societies*, European Communities, 2004.

² H. Fobelberg y H. Glimell, *Bringing Visibility To the Invisible: Towards A Social Understanding of Nanotechnology*, Goteborgs, Goteborgs Universitet, 2003.

³ Existe un proyecto hispano-mexicano que pretende clarificar filosóficamente la noción de práctica científica, distinguiéndola de las nociones clásicas de epistemología y metodología. Primeros resultados del mismo son el libro de Sergio Martínez, *Geografía de las prácticas científicas*, México, UNAM, 2003 y el artículo de J. Echeverría, “Hacia una filosofía de las prácticas científicas: de las teorías a las agendas científicas”, por aparecer en 2005.

⁴ I. Hacking, *Representing and Intervening*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983.

⁵ I. Hacking en J. Z. Buchwald (ed), *Scientific Practice*, Chicago, University of Chicago Press, 1995.

⁶ P. Galison, *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*, Chicago, The University of Chicago Press, 1997.

ellos reconoceremos la agencia del mundo material, acercándonos a la teoría de actor-red ⁷. Sin embargo, la aceptación de una agencia del mundo material en plena simetría con la agencia humana resulta problemática. Pickering, por ejemplo, acepta una agencia no humana en ciencia, pero sin perder la intencionalidad de la agencia humana y sin proyectar intencionalidad al mundo material⁸. Por tanto, afirma una asimetría que no excluye la acción de los materiales en la dinámica de la práctica científica. En tercer lugar, en este tipo de estudios se señala a la imprecisión o más bien confusión en que cae el término “práctica científica” y otros similares⁹. Según estos autores, el concepto de práctica científica puede incluir demasiado o demasiado poco.

Con el fin de precisar algo dicho concepto, vamos a enumerar y analizar un conjunto de cuestiones básicas que cabrían bajo el concepto de práctica y que normalmente aparecen en este tipo de estudios. Sin embargo, no nos interesaremos por esos grupos de cuestiones aisladamente, sino por las complejas interacciones entre ellos. Dicha enumeración no trata de ser exhaustiva ni constituye una clasificación sistemática. Únicamente pretendemos aportar un poco de orden y claridad al campo de la práctica científica.

A): Las cuestiones teóricas pueden incluir teóricos, teorías, subcultura de los teóricos (Galison), herramientas teóricas (matemáticas, lógica...), términos teóricos, parámetros, variables, umbrales y problemas teóricos que inciden en la experimentación o instrumentación...

B): Las cuestiones experimentales incluyen experimentadores, experimentos, subcultura de los experimentalistas (Galison), conocimiento práctico (*know-how*), flexibilidad interpretativa (Collins), regreso del experimentador (Collins), replicabilidad, habilidades, competencia, adiestramiento, repetición, prueba, serie, resultado, estrategias epistemológicas (Franklin), experimentos cruciales, manipulación, localización del experimento, condiciones ambientales, hipótesis auxiliares, parámetros, variables, umbrales, observación,...

C): Las cuestiones instrumentales incluirían técnicos, tecnólogos, ingenieros, subcultura de los instrumentalistas (Galison), aparatos, herramientas, artefactos, inventos, patentes, diseño, construcción, capacidades cognitivas del usuario, calibración,...

D): Las cuestiones de agencia incluirían científicos teóricos, técnicos, tecnólogos, ingenieros, diseñadores, constructores, agentes tecnocientíficos, políticos, economistas, juristas, ecologistas, civiles... y también agentes materiales (aparatos, experimentos...) y agentes sociales (fundaciones, empresas...)

E): Las cuestiones representacionales incluirían representaciones de todo tipo: diagramas, tablas, gráficos, esquemas, fotografías, anotaciones, bases de datos, simulaciones...

F): Las cuestiones de resultados se referirían a resultados de experimentos, de instrumentos, de aparatos, resultado positivo/negativo/dudoso, su relación con parámetros, umbrales, variables...

G): Las cuestiones de procesamiento y publicidad de esos resultados, registros, ordenadores (*software, hardware...*), medios de hacerlos públicos (artículos en revistas, informes, conferencias en congresos...), credibilidad...

⁷ B. Latour, *La esperanza de Pandora. Ensayos sobre la realidad de los estudios sobre la ciencia*, Barcelona, Gedisa, 2001 y M. Callon y B. Latour en A. Pickering, *Science as Practice and Culture*, Chicago, University of Chicago, 1992.

⁸ A. Pickering, “The Mangle of Practice: Agency and Emergence in the Sociology of Science” en *American Journal of Sociology* 99, 1993, pp. 559-89.

⁹ I. Hacking en J.Z. Buchwald, (ed), *Scientific Practice*, Chicago, University of Chicago Press, 1995; Y. Gingras en J. Z. Buchwald, (ed), *Scientific Practice*, Chicago, University of Chicago Press 1995.

H): Las cuestiones sobre nociones tales como precisión, calibración, estandarización, normalización, magnitudes, metrización, escalas, observabilidad, credibilidad y quizá también valores como los kuhnianos de precisión, generalidad, coherencia, simplicidad y fecundidad....

I): Las cuestiones contextuales¹⁰ incluirían aspectos tales como las condiciones institucionales, los laboratorios (universitarios, industriales...), la tecnociencia, la diferencia *Big science-small science*, los macroprogramas *Converging Technologies*, y por tanto, otras cuestiones de la agenda científica, como las políticas científicas, la participación ciudadana...

La filosofía de la práctica científica ha de ocuparse, como mínimo, de todos estos aspectos, cada uno de los cuales presenta problemas específicos. El ejemplo de las nanotecnologías muestra claramente esa diversidad de cuestiones.

3.- Algunos problemas conceptuales de las nanotecnologías.

La segunda y más extensa parte de este texto se dedicará a presentar e introducir al lector en los problemas de la práctica científica nanotecnológica. Nos centraremos en los programas que diversos países han formulado recientemente para promover la las nanotecnologías, bajo la denominación *Converging Technologies* (CTs). Los dos principales informes de los que se dispone en la actualidad, *Converging Technologies for the European Knowledge Society* (CTEKS)¹¹ y *Converging Technologies of Human Performance* (CTIHP)¹² comparten algunas notas básicas pero difieren significativamente. Para el informe *Converging Technologies for the European Knowledge Society* (CTEKS), CTs comprende tecnologías capacitadoras y sistemas de conocimiento que convergen entre sí para la consecución de un objetivo común. El programa europeo CTEKS incluye las nanotecnologías, las biotecnologías, las tecnologías de la información, las ciencias sociales y las humanidades (ciencia cognitiva, ciencias medioambientales, teoría de sistemas, filosofía, economía, derecho...). Por su parte, el texto americano *Converging Technologies for the Improvement of Human Performance* (CTIHP) varía la definición incidiendo en la combinación sinérgica de cuatro grandes provincias de ciencia y tecnología “NBIC” (nano-bio-info-cogno), que actualmente progresan rápidamente.

Según el informe europeo, las CTs se caracterizan mediante cuatro notas:

- 1) Empotramiento (Embeddedness), estas tecnologías quedan empotradas en la sociedad, se distribuyen espacialmente en ella, su fuerza se extiende y penetra discretamente (a mejor funcionamiento menos conscientes somos de nuestra dependencia), con el peligro de la construcción total de un mundo artificial;
- 2) Alcance ilimitado, todo puede ser tecnologizado y todo puede tener una solución tecnológica (mente, interacciones sociales, estados emocionales...) por lo que el peligro de determinismo tecnológico y dependencia de él se hace patente;

¹⁰ La denominación “cuestiones contextuales” es obviamente controvertida. De momento, ténganse presente el objetivo de esta enumeración, a saber, no ser exhaustiva ni clasificatoria sino aportar un poco de orden y claridad al campo de la práctica científica.

¹¹ A. Nordman, *Converging Technologies – Shaping the future of European Societies*, European Communities, 2004.

¹² M. C. Roco. y W. S. Bainbridge, (ed.) *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Arlington, VA, USA: National Science Foundation, 2002.

- 3) Ingeniería de la mente y del cuerpo, el CTEKS no pretende modificar la mente o el cuerpo a través de implantes, como propone el CTIHP, sino más bien utilizar otro tipo de herramientas para mejorar el software;
- 4) Especificidad, sería la capacidad de encontrar soluciones para tareas concretas y específicas con el consecuente riesgo de invisibilidad de estas prácticas y su desestabilizante efecto social.

En general, CTEKS ofrece también algunas críticas a su equivalente americano CTIHP, básicamente sobre el énfasis de este último en el potencial de mejora de los humanos (mental y físico). El programa europeo hace hincapié en el proceso de constitución de la agenda científica.

Sin duda, estas cuestiones son cruciales en temas de agencia, política científica, agenda científica y nos proporcionan valiosa información para entender mejor la práctica científica. Según algunos autores, estos nuevos informes y las medidas que de ellos se derivan abrirían la posibilidad política de hacer las cosas bien desde el principio¹³, porque, como hemos indicado, dicha convergencia surge de la propia práctica científica. Otro argumento para estudiar los programas CTs consiste en dilucidar si dichos proyectos caen dentro de lo que se denomina tecnociencia¹⁴. El interés militar y empresarial, el fomento mediante programas de políticas científicas, la importancia de las tecnologías de la información son algunos de los rasgos centrales de la tecnociencia que se manifiestan claramente en las nanotecnologías. Además de clarificar la práctica científica, el estudio de los programas CTs permite indagar también la noción de práctica tecnocientífica.

Ambos informes atribuyen un papel fundamental a las nanotecnologías dentro de los *Converging Technologies*. Las nanotecnologías forman parte de las “enabling technologies” o tecnologías capacitadoras (según CTEKS, “an enabling technology enables technological development on a broad front. It is not dedicated to a specific goal or limited to a particular set of applications”). También entrarían en el grupo de las tecnologías disruptivas, aquellas que provocan el cambio y los efectos bruscos¹⁵. Por tanto, poseen las cuatro características que señalaba el informe europeo (empotramiento, alcance ilimitado, ingeniería para el cuerpo y la mente, especificidad). En resumen: las nanotecnologías constituyen el principal ejemplo de los programas *Converging Technologies* (CTs).

Hablaremos de “nanotecnologías”, en plural, porque nos referimos a un grupo diverso de ciencias y tecnologías. Los avances recientes en ese conjunto de disciplinas son los que producen la convergencia de dominios¹⁶. La interdisciplinariedad de dominios erosiona o hace colapsar las demarcaciones galisonianas entre teóricos, experimentadores e instrumentalistas¹⁷. A este respecto sería interesante la propuesta de Galison de la *trading zone* o lugar de intercambio entre las diferentes subculturas que podría ser considerado como un antecedente de la convergencia. No obstante, nuestra demarcación entre las diferentes cuestiones ha hecho hincapié precisamente en la interacción entre ellas. CTEKS menciona dos notas que demuestran el poder de convergencia de las nanotecnologías: primera, todas las cosas materiales, en última

¹³ H. Glimell y H. Fogelberg, *Bringing Visibility To the Invisible: Towards A Social Understanding of Nanotechnology*, Goteborgs, Goteborgs Universitet, 2003, p. 2.

¹⁴ J. Echeverría, *La revolución tecnocientífica*, Madrid, FCE, 2003.

¹⁵ J.M. De Cozar Escalante, J.M., “Nano y biotecnologías: un encuentro perturbador”, 2004, cedido por el autor.

¹⁶ A. Nordman, *Converging Technologies – Shaping the future of European Societies*, European Communities, 2004, p. 12.

¹⁷ H. Glimell y H. Fogelberg, *Bringing Visibility To the Invisible: Towards A Social Understanding of Nanotechnology*, Goteborgs, Goteborgs Universitet, 2003, p. 3.

instancia, están formadas por átomos y moléculas (agrupamiento por escala métrica de trabajo) y segunda, el punto de vista nanotecnológico permite reunir diversas ciencias y tecnologías bajo un único paradigma de ingeniería. Las nanotecnologías se basan en la nueva capacidad de operar a escala nano y, por tanto, de modificar átomos y moléculas previamente existentes.

La dificultad de abordar de manera unívoca y directa los diversos problemas de la práctica nanotecnológica obliga a establecer divisiones o clasificaciones. Una posible agrupación de los principales problemas la ofrece por el informe británico: nanomateriales; nanometría; electrónica, optoelectrónica y tecnología de la información y la comunicación¹⁸. Otros autores proponen distinguir entre nanoelectrónica y nanotecnología molecular¹⁹. Unos y otros reconocen que esos grupos se solapan, por lo que no estamos ante clasificaciones propiamente dichas: las nanotecnologías cuestionan las fronteras entre las diversas disciplinas científico-tecnológicas. Por nuestra parte, en lo que sigue vamos a centrarnos en los nanomateriales y la nanometría, sin olvidar su incidencia en problemas importantes para la filosofía de la práctica científica, como la instrumentación y experimentación.

La denominación “nanotecnología” es imprecisa, al igual que la expresión de “práctica científica”. Suele usarse en plural, dando mayor extensión al término. Estamos ante un grupo híbrido de ciencias y tecnologías, por lo que la imprecisión afecta a otros elementos de la práctica nanocientífica. En el fondo, la distinción entre nanociencia y nanotecnología no es muy útil, puesto que ya ha sido aceptada la convergencia tecnológica y la inclusión de todo este tipo de actividades en la tecnociencia. Si adoptamos esta terminología, podríamos acuñar el término “nanotecnociencia”, pero resulta un tanto engorroso²⁰. Si tenemos en cuenta la pregunta de Armstrong, “Which nanotechnology are we supposed to be talking about?”, puede que nos veamos abocados a dilemas similares a los que él plantea. La expresión “nanotecnología” puede aludir a los métodos de fabricación de la tecnología tradicional del silicio con nuevos materiales de la biología o la genética, o también puede referirse a una tecnología basada en la ciencia química y de materiales para producir diminutas partículas con propiedades interesantes; o puede ser un híbrido de los dos significados anteriores, o aludir a algo totalmente diferente²¹. Algunos afirman que no es fácil definir la nanotecnología: “there is no simple answer to the question What is nanotechnology?”²². En resumen, existe una gran amplitud y heterogeneidad de acepciones, tanto en lo que respecta a los contenidos, objetivos y métodos que reciben esa denominación.

En cuanto a los objetos investigados por las nanotecnologías, también surgen confusiones. Pese a la aparente claridad del concepto “nano”, que alude a la billonésima parte de un metro, no es tan fácil definir lo que sea un objeto “nano”, un nanomaterial, un instrumento nanotecnológico, una nanopartícula, un nanorobot autoensamblador. ¿Cuántas dimensiones de algo material deben ser de escala nano para que sea considerado como un nanomaterial? ¿Un instrumento nanotecnológico debe ser de escala “nano”? Por otra parte, los materiales y los instrumentos se solapan: ¿puede un

¹⁸ The Royal Society and The Royal Academy of Engineering, *Nanoscience and Nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, Londres, 2004.

¹⁹ H. Fobelberg y H. Glimell, *Bringing Visibility To the Invisible: Towards A Social Understanding of Nanotechnology*, Goteborgs, Goteborgs Universitet, 2003.

²⁰ J.M. De Cozar Escalante, “Nano y biotecnologías: un encuentro perturbador”, 2004, cedido por el autor.

²¹ Armstrong en M. C. Roco, y W. S. Bainbridge, (eds) *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Arlington, VA, USA: National Science Foundation, 2001

²² H. Fobelberg y H. Glimell, *Bringing Visibility To the Invisible: Towards A Social Understanding of Nanotechnology*, Goteborgs, Goteborgs Universitet, 2003, p. 13.

nanomaterial ser a su vez un instrumento? ¿Cómo distinguir los procesos de construcción y manipulación de los de aplicación? Actualmente hay algunas respuestas para estas cuestiones, pero no son definitivas y están sujetas a debate²³.

El informe del Reino Unido define nanomaterial cuando al menos una dimensión es de menos de 100 nm y distingue tres tipos de materiales: los que tienen una dimensión en nanoescala y las demás no (films, capas ...); los que tienen dos dimensiones en nanoescala (nanowires, nanotubos ...); y los que tienen tres dimensiones en nanoescala (nanopartículas que surgen como precipitados, coloides, *quantum dots* y materiales nanocristalinos). Por otra parte, los nanomateriales pueden aparecer en la naturaleza, autoensamblarse o bien ser ensamblados por el hombre con la ayuda de alguna herramienta. De ahí surge otro criterio de clasificación, según tengan origen natural o humano. Otro tanto cabe decir de su control, que puede ser natural, humano o estar a cargo de cyborgs posthumanos, como algunos sugieren²⁴. En cualquier caso, los materiales a escala nano difieren de los materiales de mayor escala en lo que respecta a propiedades, debido al incremento del área de superficie relativa y a los efectos cuánticos. Entender la estructuración de los nanomateriales tendría una consecuencia importante: permitiría controlar los efectos y conseguir los deseados evitando los peligrosos.

Este panorama inicial nos muestra que hay muchas dificultades conceptuales a la hora de hablar de las nanotecnologías: la investigación también ha de ser filosófica. Nos centraremos a continuación en otro tipo de problemas, que también tienen relevancia filosófica.

4.- Nanometría.

La nanometría ofrece, quizá, uno de los debates más interesantes desde una perspectiva epistemológica. Si ya era difícil definir los nanomateriales o las nanoestructuras, el problema se acentúa a la hora de medir a escala nano.

Por un lado, en el universo cuántico las vibraciones o variaciones ambientales tienen grandes efectos. A esto se añade el principio de incertidumbre de Heisenberg que establece la imposibilidad de medir posición y velocidad de un electrón a la vez, esto es, de conocer la posición de una partícula por un espacio largo de tiempo. Autores como Drexler han intentado quitarle importancia a esta imprecisión a nivel subatómico, indicando que lo importante son los átomos²⁵. Es cierto que, en principio, se trata de ensamblar átomos para conseguir moléculas, pero resulta difícil prescindir de los electrones: de ellos depende el efecto túnel en el que se basan diversos microscopios. Por otro lado, la nanometría no sólo incluye la medida de la longitud y el tamaño, sino también la fuerza, la masa, la carga eléctrica y otras propiedades.

En cuanto a la medida de la longitud, los métodos comparativos resultan inútiles a escala nano. Actualmente tampoco existe una caracterización para medidas de fuerza entre el piconewton y el micronewton. También se espera la medición de moléculas individuales. En general, en estas cuestiones surgen problemas importantes que tienen que ver con la estandarización, la normalización, las escalas... La nanotecnología ofrece una extraordinaria oportunidad para reflexionar sobre los procesos de establecimiento de estándares de medida. Siendo éste un problema típico

²³ Corresponde a esta investigación averiguar si es tan sólo una primera impresión o se ratifica en un amplio espectro bibliográfico

²⁴ B. Bensaude-Vincent, *Two Cultures of Nanotechnology?* en *HYLE- International Journal for Philosophy of Chemistry*, Vol. 10, No. 2, 2004, pp. 65-82.

²⁵ E., Drexler, *Engines of Creation* (www.foresight.org), 1986.

de las ciencias experimentales, su estudio permitirá abordar cuestiones relevantes acerca de la práctica científica.

Para afrontar este problema, es necesario reflexionar sobre la instrumentación en nanotecnologías, y en particular sobre los instrumentos de medición. Partiremos de las distinciones propuestas por Whan sobre nanoinstrumentos²⁶. Para medir propiedades a escala nano hacen falta diversos instrumentos: unos para determinar la posición de los átomos en materiales, otros para observar y caracterizar las superficies, y un tercer tipo formado por mecanismos espectroscópicos para obtener información de propiedades de nanoestructuras. Entre todos estos instrumentos prestaremos particular atención a los microscopios, aunque sólo sea por su larga tradición en la historia de la ciencia.

Básicamente, la microscopía utiliza rayos de electrones para obtener imágenes de superficies de estructuras. Las tres técnicas instrumentales más utilizadas son: la microscopía electrónica de transmisión, la microscopía de campo iónico y la microscopía de barrido. En el TEM (*Transmission Electron Microscope*) el rayo de electrones es arrojado hacia la muestra y es esparcido (*scatter*) sobre ella, para luego pasar por unas lentes, ser amplificado y finalmente producir la imagen. Las imágenes se forman porque los diferentes átomos interactúan con y absorben los electrones en cierto grado. Se utiliza para investigar internamente las micro y nanoestructuras. Esta técnica resuelve films-muestras desde 12 nm. hasta decenas o centenas de nanómetros. En el caso de muestras más delgadas o más gruesas, surgen problemas de imágenes inútiles, borrosas o difíciles de interpretar.

La microscopía del campo iónico requiere un cable con una punta fina situado en una cámara de vacío: la punta se carga positivamente. Esta técnica se vale del efecto ionizador de la punta que carga positivamente electrones provenientes de moléculas gaseosas. Los cationes gaseosos (ion con carga positiva) son repelidos por la punta e impactan en el plato fotográfico creando puntos. La distribución de los puntos en la fotografía representa la distribución de los átomos en la punta.

Los microscopios de barrido son de tres tipos: microscopio electrónico de barrido de transmisión (SEM), microscopio de barrido efecto túnel (STM) y microscopio de fuerzas atómicas (AFM). El primero se sirve de la técnica del TEM siendo el rayo de electrones el que escanea la muestra; los otros dos son los más representativos en las actuales investigaciones nanotecnológicas. El STM es un cable con una punta fina positivamente cargada que actúa como una sonda cuando está sobre 1 nm. de la superficie estudiada. Los electrones de los átomos, atraídos por la sonda, saltan y forman lo que se llama efecto túnel: generan una corriente eléctrica débil. La sonda es escaneada hacia delante y hacia detrás a lo largo de la superficie y ofrece un mapa de la distribución de los átomos de la superficie. Normalmente se utiliza un escáner trípode piezoeléctrico. El AFM se diferencia del STM en que monitoriza la fuerza ejercida entre la superficie y la punta de la sonda. En general, las técnicas de barrido proporcionan información sobre la topografía y estructura de superficies a distancias próximas a la escala atómica.

Algunos de los principales problemas que afectan a estos instrumentos son problemas clásicos en los estudios de prácticas como la calibración²⁷. Comparando microscopios de barrido ocurre que, a pesar de que los fabricantes proporcionan a los

²⁶ Citado en C.P. Poole y F.J. Owens, *Introduction to Nanotechnology*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003.

²⁷ La calibración ha sido estudiada por A. Franklin, *The Neglect of Experiment*, Cambridge, Cambridge University Press 1986, como una estrategia epistemológica y por H.M. Collins, *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, 2nd e., Chicago, University Chicago Press, 1992 como una muestra de los acuerdos necesarios para cerrar controversias

usuarios estándares de calibración con su equipamiento, software y procedimientos de calibración, los usuarios (personal especializado) no logran que el equipamiento esté satisfactoriamente calibrado²⁸. El informe del Reino Unido y el de la *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* de Alemania concluyen que, incluso usuarios expertos de AFM, pueden producir amplias variaciones a la hora de medir los mismos artefactos. En resumen: la calibración a nanoescala no está resuelta, con el consiguiente problema para comparar datos entre diferentes laboratorios. El informe británico señala que, dentro de un mismo laboratorio, es posible lograr una cierta consistencia en la calibración, dados los niveles de protección contra las vibraciones y los cambios de temperatura; sin embargo, la determinación de valores absolutos de longitud a escala nanométrica es muy difícil y costosa. Tanto las formas de diseñar las imágenes de los microscopios como los sistemas de procesamiento, las gráficas obtenidas, su interpretación ulterior y las tablas finales, todas ellas aportan interesantes problemas representacionales para la práctica nanotecnológica. En este artículo no profundizaremos en estas cuestiones, pero su importancia filosófica es indudable.

5.- El problema de la replicación

No obstante, los problemas de instrumentación en el ámbito de las nanotecnologías no son los únicos. También surgen en relación a las nanomáquinas, los nanoaparatos y los nanomotores²⁹. Una nanomáquina o un nanorobot puede ser un instrumento con el que crear otras estructuras, esto es un ensamblador. Ello suscita el escenario drexleriano de máquinas capaces de construir copias de sí mismas, replicadores³⁰. Los debates en torno a los autoensambladores o replicadores han sido muy vivos, pero aquí sólo se trata de mencionarlos, dejando abierto el problema, de gran envergadura para la filosofía de la tecnología y la teoría de la autoorganización.

La falta de estándares de medida y la mala calibración de instrumentos y aparatos traen consigo importantes problemas a la hora de replicar experimentos y resultados. Para terminar, comentaremos dos problemas relacionados con la replicabilidad. Se trata de un problema epistemológico básico, que ha sido estudiado por diversos autores, pero no en relación a las nanotecnologías.

En primer lugar, la flexibilidad interpretativa de los experimentos postulada por el EPOR (*Empirical Program of Relativism*) está basada en los problemas de replicabilidad. Dados dos experimentos a y b, supongamos que a es el experimento original, al que le atribuimos las siguientes características: da cuenta de un fenómeno completamente inesperado, al menos en parte; necesita presupuestos teóricos nuevos o al menos variaciones respecto a las teorías aceptadas; las técnicas empleadas son conocidas, aunque pueden requerir nuevos instrumentos, etc. El experimento b es la réplica de a y, en principio, tiene características que hacen que b sea tal réplica. Sin embargo, a la hora de intentar enumerarlas nos encontramos algunos problemas. ¿De qué fenómeno debe dar cuenta? ¿Debe utilizar la misma teoría y técnica empleada en a, siendo ésta novedosa, o bien debe preferir el conocimiento asentado en la ciencia general? ¿Debe usar b los mismos materiales de construcción que a? ¿Debe repetir las mismas series, los mismos ciclos, en los mismos días y en la misma estación y época del año? ¿Debe hacerlo el mismo experimentador, en cuyo caso no tendría mucho valor

²⁸ Breil, R. et al “Intercomparison of scanning probe microscopes” en *Precision Engineering*, 26, 2002, pp. 296-305.

²⁹ De las nanomáquinas, nanoaparatos, y nanomotores hablan C. P. Poole, y F.J. Owens en *Introduction to Nanotechnology*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003.

³⁰ E. Drexler, *Engines of Creation* (www.foresight.org), 1986.

como replicación? ¿Quizá bastaría con un experimentador del mismo laboratorio? Algunas de las magnitudes utilizadas podrían no volverse a calcular sino aceptarse sin más, pero entonces no se detectaría un posible fallo en la determinación de dichas magnitudes ¿Tal vez ayudaría que el experimentador tuviera las mismas creencias que el original? Si las creencias influyen demasiado se convertirían en prejuicios. Y volviendo al problema inicial básico de la replicabilidad: ¿debe obtener el mismo resultado? Claro que si el resultado está dado, ¿cómo puede servir la replicación b para probar la validez de a?

Todas estas cuestiones muestran la dificultad de precisar qué significa que b es una réplica de a. Algunas de las preguntas convergen con los problemas de instrumentación arriba comentados. Podrían intentar resolverse distinguiendo entre tipos de replicabilidad o reproducibilidad del experimento, como propone Radder: reproducibilidad de la realización material de un experimento, reproducibilidad de un experimento bajo una interpretación teórica fijada y reproducibilidad de un resultado g de un experimento³¹. Esta última acepción sería la replicación en su sentido fuerte. No obstante, en el caso de las nanotecnologías no es fácil de lograr, debido a los problemas de instrumentación arriba comentados. En resumen, los problemas de calibración y replicación se superponen en el caso de las nanotecnologías.

En segundo lugar, Franklin ha estudiado la calibración como una de las estrategias epistemológicas utilizadas para cerrar los debates en torno al sentido de un experimento. Entre esas estrategias se encuentran las siguientes: comprobaciones, pruebas experimentales y calibración a partir de fenómenos conocidos; reproducción de artificios controlables y presentes de antemano; eliminación de todas las fuentes de error y explicaciones alternativas; apelación a las regularidades y propiedades de los fenómenos mismos que prueban que no son artificios; empleo de la teoría de los fenómenos corroborada independientemente; empleo de aparatos basados en teorías bien corroborada; utilización de argumentos estadísticos, etc³². La dificultad de la instrumentación y la experimentación en las nanotecnologías se pone de manifiesto en este tipo de cuestiones y requiere un análisis cuidadoso de las diversas soluciones teóricas a las que recurre la práctica nanotecnológica. Un análisis así podría aportar mucho al estudio de la práctica científica, tal y como ésta se produce en el caso de las nanotecnologías.

No pretendemos resolver aquí estos problemas, entre otras cosas porque las técnicas de calibración y los procedimientos para lograr la replicabilidad de las observaciones y los experimentos están en pleno desarrollo en el caso de las nanotecnologías. Se trata únicamente de mostrar el gran interés que este nuevo campo científico-tecnológico tiene para la filosofía de la práctica científica. La mayoría de los grandes problemas estudiados en ejemplos históricos vuelve a replantearse aquí, pero con diferencias significativas, debido a que la investigación nanotecnológica involucra diversas disciplinas científicas y tecnológicas, no una sola. Esta es una de las razones por las que consideramos que las nanotecnologías son un caso de estudio particularmente relevante.

6.- Conclusiones provisionales.

Este recorrido general por el panorama de las nanotecnologías muestra su gran interés para la filosofía de la práctica científica. Las diferentes cuestiones confluyen y convergen entre sí, configurando una manera específica de proceder en la práctica

³¹H. Radder en Buchwald, (ed) , *Scientific Practice*, Chicago, University of Chicago Press, 1995.

³² A. Franklin, *The Neglect of Experiment*, Cambridge University Press 1986.

nanotecnológica. Las incertidumbres del estudio teórico a nivel cuántico se reflejan en la imprecisión del instrumental; los instrumentos y su deficiente calibración aportan problemas de medida, de estándares y, por tanto, plantean dificultades de normalización de los resultados; a su vez, en este ámbito experimental la replicación no se consigue fácilmente; en cuanto a las representaciones, por ejemplo las micrografías, han de ser diseñadas en función de expectativas teóricas; a continuación, estos resultados se procesan, discuten y comunican a la comunidad de nanotecnólogos; por otra parte, son varias las comunidades científicas involucradas, como muestran los programas *Converging Technologies*; por último, las cuestiones de agenda y política científica definen la manera en la que se procederá en un futuro sobre todas las cuestiones anteriores.

La panorámica que hemos presentado muestra la gran complejidad de la práctica nanotecnológica, así como su indudable interés filosófico. No cabe duda de que el estudio filosófico de la práctica científica se verá muy enriquecido si se analizan los diversos problemas planteados por la investigación en el ámbito de las nanotecnologías. Hemos pretendido llamar la atención sobre este nuevo ámbito científico, que hasta el momento ha sido poco estudiado desde una perspectiva filosófica. Independientemente de los problemas teóricos, que también los hay, un estudio a fondo de las nanotecnologías proporcionará un conocimiento más sistemático y profundo acerca de la práctica científica, sus componentes principales, su interacción y, en definitiva, su dinámica interna.

Bibliografía

- Bensaude-Vincent, B., "Two Cultures of Nanotechnology?", *HYLE- International Journal for Philosophy of Chemistry*, Vol. 10, No. 2, 2004, pp. 65-82.
- Breil, R. et al, "Intercomparison of scanning probe microscopes" en *Precision Engineering*, 26, 2002, pp. 296-305.
- Buchwald, J.Z., *Scientific Practice*, Chicago, University of Chicago Press, 1995.
- Collins, H., *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, 2nd e., Chicago, University Chicago Press, 1992.
- Crandall, B. C., (ed.), *Nanotechnology: Molecular Speculations On Global Abundance*, Cambridge, The MIT Press, 1996.
- De Cozar Escalante, J.M., "Nano y biotecnologías: un encuentro perturbador", 2004, cedido por el autor
- Drexler, E., *Engines of Creation*, 1986, (www.foresight.org)
- Echeverría, J, *La revolución tecnocientífica*, Madrid, FCE, 2003.
- Feynman, R.P., "There's Plenty of Room at the Bottom" *Engineering and Science*, 23, 1960, pp. 22-36.
- Fogelberg, H. y Glimell, H., *Bringing Visibility To the Invisible: Towards A Social Understanding of Nanotechnology*, Goteborgs, Goteborgs Universitet, 2003.
- Franklin, A., *The Neglect of Experiment*, Cambridge University Press, 1986.
- Galison, P., *How experiments end*, Chicago, University of Chicago Press, 1987.
- Galison, P., *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*, California, Stanford University, 1992.
- P Galison, P., *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*, Chicago, The University of Chicago Press, 1997.
- Gooding, D., Pinch, T. & Schaffer, S., *The Uses of Experiment*, Cambridge University Press, 1989

- Hacking, I., *Representing and Intervening*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983.
- Hennig, J., "Changes in the Design of Scanning Tunneling Microscopic Images from 1980 to 1990" en *Techné: Research in Philosophy and Technology*, Vol. 8, No. 2, 2004.
- Knorr-Cetina, K. D. y Mulkay, M.J. (eds.) (1982), *Science observed*, Beverly Hills, Sage.
- Kuhn, T.S., *La estructura de las revoluciones científicas*, México, FCE, 1975.
- Latour, B., *Ciencia en acción*, Barcelona, Labor, 1992.
- Latour, B. y Woolgar, S., *La vida en el laboratorio. La construcción de los hechos científicos*, Madrid, Alianza, 1995.
- Nordmann, A., *Converging Technologies – Shaping the future of European Societies*, European Communities, 2004.
- Latour, B., *La esperanza de Pandora. Ensayos sobre la realidad de los estudios sobre la ciencia*, Barcelona, Gedisa, 2001.
- Nanotechnology, Innovation for tomorrow's world*, European Comisión, 2004
- Pickering, A., *Science as Practice and Culture*, Chicago, University of Chicago, 1992.
- Pickering, A., "The Mangle of Practice: Agency and Emergence in the Sociology of Science" en *American Journal of Sociology* 99, 1993, pp. 559-89.
- Pickering, A., *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, Chicago, University of Chicago Press, 1995.
- Poole, C.P. y Owens, F.J., *Introduction to Nanotechnology*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- Roco, M.C. y Bainbridge, W.S. (ed.), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Arlington, VA, USA: National Science Foundation, 2001.
- Roco, M.C. y Bainbridge, W.S. (ed.) *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Arlington, VA, USA: National Science Foundation, 2002.
- The Royal Society and The Royal Academy of Engineering, *Nanoscience and Nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, Londres, 2004
- Serena, P. A. y Correia, A., "Nanotecnología: el motor de la próxima revolución tecnológica", *Apuntes de Ciencia y Tecnología* No 9, 2003, pp. 32-42.
- "Theoria experimentorum," *Theoría* , segunda época, Vol. 17/2, 2002.