



## **TRADICIONES DE EVIDENCIA EN LA INVESTIGACIÓN A ESCALA NANOMÉTRICA: UNA APROXIMACIÓN A LA “CULTURA EPISTÉMICA” DEL MUNDO DE LO PEQUEÑO**

AILIN MARÍA REISING\*

### **RESUMEN**

En la década de 1980, el desarrollo de tecnologías como el microscopio de barrido de efecto túnel y el microscopio de fuerza atómica permitió hacer de la manipulación de estructuras atómicas y moleculares una realidad fácticamente posible. En gran medida, ello obedeció a que estas tecnologías ofrecieron una plataforma ontológica a nivel subatómico, atómico y molecular en torno a la cual, disciplinas como la física, la química, la biología, la informática y la ingeniería conformaron una “cultura epistémica” (Knorr Cetina, 1999), que ha hecho de la revalorización del conocimiento visual un rasgo ineludible de la investigación a escala nanométrica.

Atendiendo a ello, el presente trabajo constituye una aproximación inicial a la caracterización socioepistémica de las prácticas nanotecnocientíficas que explora, a través del análisis de los recursos representacionales usualmente utilizados como evidencia, sus puntos de contacto y de ruptura con la práctica científica tradicional. En este sentido, procura mostrar que si bien la investigación a escala nanométrica se ha constituido fragmentariamente en torno a visiones mecanicistas (Drexler, 2001) y adaptativas (Smalley, 1999) de las nanoestructuras que permitirían establecer un nexo con las concepciones epistemológicas de la ciencia del siglo xx, es posible reconocer, en sus formatos de codificación del conocimiento, una subversión de las “tradiciones de evidencia”, que autores como Peter Galison (1997) han reconocido en la ciencia de ese período.

Con tal propósito, el trabajo se ha estructurado en tres secciones. Una primera que analiza los supuestos epistemológicos, ontológicos y metodológicos de las visiones mecanicistas y adaptativas de las nanoestructuras en vistas a ofrecer una caracterización inicial de la “cultura epistémica” (Knorr Cetina, 1999) del mundo de lo pequeño. Una segunda, que estudia las implicancias epistemológicas de tales visiones en relación con las “tradiciones de evidencia”, que dieron lugar a la posibilidad misma de la investigación a escala nanométrica. Y finalmente una tercera, que aborda, a través de una aproximación empírica a la conformación del campo nanotecnocientífico en la Argentina, el proceso de codifi-

\* CONICET, Fundación Bariloche, <ailinr@bariloche.com.ar>.

cación del conocimiento que tiene lugar en torno a los instrumentos de microscopía frecuentemente utilizados en este campo de conocimiento.

*PALABRAS CLAVE: CULTURA EPISTÉMICA – CODIFICACIÓN DEL CONOCIMIENTO – TRADICIONES DE EVIDENCIA – INSTRUMENTOS*

## INTRODUCCIÓN

En la reunión anual de la American Physical Society de 1959, Richard Feynman pronunció la conferencia “There’s Plenty of Room at the Bottom”. Allí planteó que las leyes de la física no contradicen la posibilidad de diseñar materiales mediante mecanismos de enlace atómico en patrones estables, promoviendo el desarrollo de investigaciones en una escala hasta entonces no considerada: la nanométrica. Desde entonces, transcurrieron más de veinte años hasta el momento en que tales investigaciones pudieron trascender el plano teórico y hacer de la manipulación de estructuras atómicas y moleculares una realidad fácticamente posible.

Este logro tuvo lugar cuando Gerd Binnig y Heinrich Rohrer diseñaron el microscopio de barrido de efecto túnel (1982)<sup>1</sup> y cuando, posteriormente, Binnig, junto a Calvin Quate y Christoph Gerber, dieron forma al microscopio de fuerza atómica (1986). Estos instrumentos promovieron que buena parte de las disciplinas ligadas al diseño de materiales –entre ellas la física del estado sólido, la metalurgia y la química de polímeros– reorientaran sus investigaciones de la micro a la nanoescala, pues, a diferencia de los instrumentos disponibles hasta entonces –basados en la manipulación de átomos y moléculas en lotes– permitieron visualizar y manipular individualmente los átomos, construir estructuras atómicas y moleculares según especificaciones y estudiar efectos a escala nanométrica mediante técnicas *bottom up*,<sup>2</sup> que se sumaron a las técnicas *top down*<sup>3</sup> ya utilizadas en las ciencias e ingeniería de materiales.

Así, la investigación a escala nanométrica dio forma a un estilo de investigación que a través de la vía tecnológica ofreció una plataforma ontológica a nivel subatómico, atómico y molecular, que promovió no solo la convergencia de disciplinas como la física, la química, la biología, la informática y la ingeniería,

<sup>1</sup> Por este hecho, Binnig y Rohrer obtuvieron el premio Nobel en 1986.

<sup>2</sup> Estas técnicas permiten diseñar el material sumando un átomo a otro, dando lugar al estudio de la superficie de distintos metales, semiconductores, superconductores, polímeros, aislantes y materiales biológicos, entre otros.

<sup>3</sup> Estas técnicas construyen el material tallándolo, análogamente a como un escultor da forma a una estatua a partir de un bloque de madera, cerámica o mármol.

sino también la revalorización del conocimiento visual. En gran medida, esto último obedeció a que los mencionados instrumentos y sus *softwares* asociados configuraron un formato de codificación del conocimiento que, veremos a continuación, se contrapuso a aquel primordialmente lingüístico que desde fines del siglo XVIII caracterizó a las prácticas de validación y difusión del conocimiento científico. No obstante, como permiten observar autores como Darin Arsenault, Laurence Smith y Edith Beauchamp (2006), ello no constituye un rasgo distintivo de la investigación a escala nanométrica, sino una característica de la ciencia contemporánea. Pues, como señalan los mencionados autores, desde mediados de la década de 1980 es posible advertir que tanto las ciencias fisiconaturales como las ciencias sociales han modificado el rol asignado a las representaciones visuales en sus estructuras argumentativas, si bien unas y otras difieren en: a) el tipo de recurso visual primordialmente utilizado –los gráficos, las tablas, los diagramas, las imágenes 3D y las ecuaciones, en el caso de las primeras, las ecuaciones, las tablas, los diagramas y las fotos, en el de las segundas– y b) en el hecho de que solo las ciencias fisiconaturales parecen basar sus estrategias heurísticas en este tipo de recursos.

De este modo, al igual que lo ocurrido en otros campos de conocimiento,<sup>4</sup> la investigación a escala nanométrica ha configurado una “cultura epistémica” (Knorr Cetina, 1999) que supone la imbricación de recursos representacionales analógicos y digitales en un contexto que revaloriza el conocimiento visual. Atendiendo a ello, el presente trabajo constituye una aproximación inicial a la caracterización socioepistémica de las prácticas nanotecnocientíficas que explora, a través del análisis de los recursos representacionales usualmente utilizados como evidencia, sus puntos de contacto y de ruptura con la práctica científica tradicional. En este sentido, procura mostrar que si bien la investigación a escala nanométrica se ha constituido fragmentariamente en torno a visiones mecanicistas (Drexler, 2001) y adaptativas (Smalley, 1999) de las nanoestructuras, que permitirían establecer nexos con concepciones epistemológicas de la ciencia del siglo XX, sería posible reconocer, en sus formatos de codificación del conocimiento, una subversión de las “tradiciones de evidencia” (Galison, 1997) en torno a las cuales el propio Feynman vislumbró la posibilidad de manipular estructuras atómicas y moleculares y estudiar fenómenos a escala nanométrica.

Con el objeto de abordar esta situación, el trabajo se ha estructurado en tres secciones. Una primera, que analiza los supuestos epistemológicos, ontológicos y metodológicos de las visiones mecanicistas y adaptativas de las nanoestructuras

<sup>4</sup> Un proceso similar puede observarse, por ejemplo, en la investigación contemporánea de sistemas dinámicos, caso en el cual recursos representacionales como los mapas de Poincaré pueden constituir tanto el producto final de la investigación como la materia prima de la misma (Reising y Barrachina, 2007a).

en vistas a ofrecer una caracterización inicial de la “cultura epistémica” (Knorr Cetina, 1999) del mundo de lo pequeño. Una segunda, que estudia las implicancias epistemológicas de tales visiones en relación con las “tradiciones de evidencia” que dieron lugar a la posibilidad misma de la investigación a escala nanométrica y, finalmente, una tercera, que aborda, a través de una aproximación empírica a la conformación del campo nanotecnocientífico en la Argentina, el proceso de codificación del conocimiento que tiene lugar en torno a los instrumentos de microscopía que permitieron trascender el plano teórico de la investigación a escala nanométrica.

### **LAS VISIONES MECANICISTAS Y ADAPTATIVAS DE LAS NANOESTRUCTURAS COMO “MAQUINARIAS DE CONOCIMIENTO” DE LA “CULTURA EPISTÉMICA” DEL MUNDO DE LO PEQUEÑO**

En *Epistemic Cultures. How the Sciences Make Knowledge* (1999), Karin Knorr Cetina desarrolla el concepto “cultura epistémica” para referirse a la amalgama de acuerdos y mecanismos que establece cómo se sabe lo que se sabe en un campo de conocimiento. Como señala la autora, la construcción de los mecanismos de producción de conocimiento al interior de una “cultura epistémica” se encuentra determinada por una “maquinaria epistémica” que configura las estrategias epistemológicas, las definiciones ontológicas y los modelos de organización social que operan tras la generación, el procesamiento y la interpretación de resultados.

Tal como han señalado autores como Bernardette Bensaude Vincent (2004) y Octavio Bueno (2004), la investigación a escala nanométrica se ha desarrollado en torno a dos enfoques. Uno de cuño ingenieril, que encuentra en Eric Drexler su principal referente, y otro de cuño científico, que encuentra en Richard Smalley uno de sus exponentes más renombrados.<sup>5</sup> Como veremos más adelante, las divergencias epistémicas, ontológicas y metodológicas que presentan ambos enfoques resultan tan marcadas que cabría reconocer en ellos la influencia de distintas “maquinarias epistémicas”. En tal sentido, a diferencia de lo ocurrido en áreas como la biología molecular o la física de alta energía, donde la producción de conocimiento se ha asociado a una “maquinaria epistémica” (Knorr Cetina, 1999), en el caso de la investigación a escala nanométrica, la “cultura epistémica” parecería ser modelada en torno a dos “maquinarias epistémicas” que encuentran un punto de contacto en el soporte instrumental que hace posible la investigación.

<sup>5</sup> Tales enfoques aparecen exhaustivamente descriptos en el número especial sobre nanotecnología de *Scientific American* de septiembre de 2001 y en la correspondencia entre Richard Smalley y Eric Drexler publicada en *Chemical & Engineering News* en 2003, vol. 81, N° 48.

La primera de estas “maquinarias”, representada, entre otros, por Eric Drexler (2001), parece haber dado lugar a una visión primordialmente teórica, orientada a demostrar la posibilidad misma del desarrollo artificial de recursos nanotecnológicos. Desde esta perspectiva, y en consonancia con las concepciones de la biología molecular de la década de 1950, define a las nanoestructuras como “manufacturas moleculares” constituidas por entidades multipropósito que, respondiendo a necesidades lógico-mecánicas, guían las reacciones químicas que posicionan a las moléculas en la construcción de objetos complejos. Si bien menos explícitamente, esta concepción ontológica del nanomundo permite advertir también la influencia de los modelos cibernéticos autorreplicantes desarrollados por autores como Marvin Minsk y von Neumann.<sup>6</sup>

Ello permite reconocer en esta “maquinaria” un doble anclaje en las tradiciones que han modelado las prácticas científicas en el siglo xx. Por un lado, en la tradición mecanicista, en virtud de lo cual se asume al espacio, a la materia y al movimiento como elementos fundamentales de los ensambles moleculares. Por otro lado, en la tradición cibernética, en virtud de lo cual se supone que el funcionamiento de tales ensambles depende de la autorreplicación y el control programático (Bensaude Vincent, 2004; Bueno, 2004). Así, bajo el supuesto de que es posible replicar aspectos biomecánicos de la naturaleza en sistemas moleculares artificiales, esta “maquinaria epistémica” tiende a priorizar las técnicas *bottom up* y a ponderar las tecnologías de la representación por sobre las tecnologías de la intervención (Hacking, 1983).

Por su parte, la segunda de estas “maquinarias epistémicas”, que encuentra en Richard Smalley (1999) uno de sus principales referentes, asume a las células vivas como modelos de distinta variedad y grado de sofisticación de las “manufacturas moleculares”. Desde una perspectiva primordialmente experimental, impugna la visión mecanicista de la “maquinaria epistémica” descrita anteriormente, enfatizando que la naturaleza no constituye un modelo de orden mecánico sino un modelo de diseño que permite desarrollar estructuras susceptibles de ser adaptadas a un conjunto de *performances* (Whitesides, 2001).

En este sentido, esta “maquinaria” supone una redefinición del foco de atención de la visión mecanicista de las nanoestructuras en torno al modo en que las relaciones o interfaces de asociación determinan sus propiedades. De esta forma, contrapone a la concepción ontológicamente homogénea de los ensambles moleculares una visión ontológica heterogénea y multifuncional que remarca la adaptabilidad de los mismos a una variedad de tareas que incluye el crecimiento, la reparación y el reciclamiento de las nanoestructuras (Bensaude Vincent, 2004).

<sup>6</sup> Si bien Eric Drexler apenas alude a ello, cabe destacar que su programa de la “manufactura molecular” fue desarrollado mientras realizaba sus actividades doctorales en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, bajo la dirección de Marvin Minsky, discípulo de von Neumann.

En este contexto, establece que el propósito último de la investigación no redunda exclusivamente en el desarrollo conceptual de “manufacturas moleculares”, sino también en la exploración experimental de nanoestructuras que si bien pueden no tener *performances* óptimas desde un punto de vista mecanicista, expresan un compromiso eficiente entre sus propiedades intrínsecas y su adaptabilidad a diferentes ambientes. Ello permite identificar en esta “maquinaria epistémica” la influencia de la confianza en la variación ciega y en la selección natural propia de la biología evolucionista. Una confianza que constituida en estrategia epistémica, permite advertir que los nanocomponentes se “mueven por sí mismos” (Ball, 2002) en virtud de una dinámica intrínseca que torna a las propiedades de la materia sensibles, por ejemplo, al tamaño, tal como puede observarse en la variación de color de las nanopartículas de oro. Desde esta perspectiva, la investigación se vale de estrategias metodológicas que resultan susceptibles a los procedimientos utilizados por la naturaleza para generar estructuras nanométricas en la medida en que tratan a los objetos como materiales de procesamiento o estados transitorios en una serie de transformaciones.

A pesar de las divergencias que pueden reconocerse entre ambas “maquinarias epistémicas”, es posible identificarlas como partes de una misma “cultura epistémica” en la medida en que comparten un “terreno común” constituido en torno al andamiaje instrumental desarrollado por Binning, Rohrer, Quate y Gerber.

En virtud de tal convergencia, tanto una como otra “maquinaria” modelan una similar organización del trabajo que asume a los instrumentos como elementos indispensables para el quehacer científico (Bueno, 2004) que, al igual que lo ocurrido en áreas como la física de alta energía (Knorr Cetina, 1999), parecen operar como una suerte de *alter ego* del científico que posee una expectativa de vida y una idiosincrasia propia que lo diferencia de equipamientos análogos.

En este contexto, el “ajuste robusto” entre las concepciones teóricas, los instrumentos y el objeto de estudio al que alude Andrew Pickering (1995) al momento de abordar las prácticas científicas pareciera operar como una instancia que amalgama ambas “maquinarias epistémicas” en una dinámica de trabajo que, tal como veremos seguidamente, configura un formato de codificación del conocimiento que subvierte las “tradiciones de evidencia” (Galison, 1997) del siglo xx.

### **A PROPÓSITO DE LA RECONFIGURACIÓN DE LAS “TRADICIONES DE EVIDENCIA” DEL SIGLO XX EN EL MARCO DE LAS “MAQUINARIAS EPISTÉMICAS” DE LA INVESTIGACIÓN A ESCALA NANOMÉTRICA**

En su texto *Image and Logic* (1997), Peter Galison analiza las vertientes teóricas, experimentales e instrumentales de la ciencia del siglo xx identi-

cando dos “tradiciones de evidencia”: una de carácter visual y otra de carácter lógico.

Tal como esbozara E. Marey en *La méthode graphique dans les sciences expérimentales et particulièrement en physiologie et en médecine* (1878), la primera de estas tradiciones considera que las representaciones lingüísticas resultan inapropiadas para expresar la medida, el rango y/o la relación de un fenómeno respecto a otro. Desde esta perspectiva, se asume a los recursos visuales como representaciones completas, complejas y claras que preservan la forma en la cual una entidad o fenómeno “se presenta” en el mundo (Danston y Galison, 2007). En este sentido, la imagen es asumida como una representación isomórfica que, si bien no opera como una “fotografía de lo que ocurre” que permite al científico “ver directamente” la entidad o el fenómeno estudiado, posibilita: a) establecer las posiciones de las partículas en el marco de relaciones espaciales, b) determinar la posición relativa de una partícula en un momento determinado y c) extraer, a partir de un evento individual, información cualitativa relevante para el estudio y predicción de eventuales réplicas (Staley, 1999; Elkins, 1999).

Por su parte, la “tradicción de evidencia” de carácter lógico pondera los argumentos basados en la estadística y en las probabilidades. Desde esta perspectiva, los fenómenos son analizados en series con el propósito de atender a sus relaciones lógicas y desarrollar demostraciones sobre la base de información, que si bien permite generar agregados estadísticos relativos a los fenómenos en cuestión, resulta parcial en cuanto a las variables o rasgos considerados. En este contexto, los científicos se valen de técnicas mecánicas y/o computacionales que conforman recursos representacionales no isomórficos que, mediante códigos binarios como “sí-no”, “on-off” y/o “0-1”, detectan, identifican, clasifican y cuantifican patrones de ocurrencia (Gooding, 2003). Inicialmente estas técnicas se basaban en contadores automáticos con circuitos electrónicos que especificaban las condiciones en las cuales podía reconocerse un fenómeno, situación que cambió sustancialmente desde fines de la década de 1980 con la incorporación de procesadores que digitalizan el análisis experimental en su conjunto.

De este modo, ambas tradiciones difieren entre sí en cuanto al vínculo supuesto entre la representación y el fenómeno representado. Así, aquellas “maquinarias epistémicas” configuradas en torno a la tradición de evidencia visual suponen que tal vínculo se establece mediante recursos representacionales miméticos, al tiempo que aquellas configuradas en torno a la segunda de las mencionadas tradiciones consideran que el mismo se establece mediante representaciones homólogas para las cuales “A” representa a “B” si, y solo si, la estructura ejemplificada por “B” resulta homomórfica a la estructura ejemplificada por “A” (Elkins, 1999; 2000). Consecuentemente, aquellas “maquinarias” ligadas a la tradición de evidencia visual tienden a codificar la experiencia cognitiva median-



te “representaciones analógicas o proposicionales” que asumen a la experiencia sensorial como instancia primigenia de la generación de conocimiento, mientras que aquellas afines a la tradición de evidencia lógica tienden a hacerlo mediante “representaciones digitales o numéricas” que consideran a la clasificación y a la manipulación simbólica como modalidades primarias del razonamiento (Goodman, 1968).

En este contexto, cabría identificar a las “maquinarias de conocimiento” analizadas en la sección anterior con la tradición de evidencia lógica, en la medida en que el abordaje ontoepistemológico de las nanoestructuras sostenido tanto por la visión mecanicista como visión adaptativa de las nanoestructuras supone la ponderación de argumentos basados en la estadística y en las probabilidades y el uso de representaciones homólogas. Sin embargo, como veremos en el próximo apartado, la relevancia asignada por ambas “maquinarias” al andamiaje instrumental permite también reconocer en ellas el influjo de la tradición de evidencia visual. Un influjo que parece dar lugar a un formato de codificación del conocimiento que concilia el conocimiento ingenieril y el conocimiento físico químico mediante recursos representacionales visuales que suponen habilidades lógicas y matemáticas (Meyer y Kuusi, 2004).

### **LA INVESTIGACIÓN A ESCALA NANOMÉTRICA EN LA ARGENTINA: UNA APROXIMACIÓN EMPÍRICA AL PROCESO DE CODIFICACIÓN DE RESULTADOS DEL MUNDO DE LO PEQUEÑO**

En el contexto latinoamericano, la investigación a escala nanométrica comenzó a ser oficialmente impulsada en el año 2000, paralelamente al lanzamiento de la estrategia gubernamental estadounidense para el desarrollo conceptual y tecnológico de las nanotecnociencias (National Nanotechnology Initiative, 2000).<sup>7</sup> En aquel entonces, Brasil tomó la delantera lanzando su Programa Nacional de Nanotecnología en el marco de la Iniciativa Científica Milenium.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Esta estrategia implicó la creación de treinta centros de I+D entre 2004 y 2006, la implementación de programas de formación que se sumaron a los que desde 1986 impulsaba el Foresight Nanotech Institute y una inversión que ascendió de 422 millones de dólares en el año 2001 a 3.000 millones en el año 2003 (Forbes, 2004).

<sup>8</sup> La Iniciativa Científica Milenium facilitó, mediante créditos del Banco Mundial, la creación de laboratorios especializados en países en vías de desarrollo. En el caso de Brasil, la misma permitió la creación de cuatro Institutos Milenium y dio lugar a una inversión gubernamental en el área nanotecnocientífica de aproximadamente 28 millones de dólares entre los años 2004 y 2007. Otro país latinoamericano que también aplicó a la Iniciativa Científica Milenium fue Chile, a través de lo cual creó el Núcleo Milenio de la Materia Condensada, uno de los únicos centros del país dedicado a la investigación nanocientífica.

Posteriormente y conjuntamente a la implementación de la Estrategia Europea para las Nanotecnologías en el año 2004,<sup>9</sup> la Argentina comenzó a promover las actividades de investigación y desarrollo a escala nanométrica declarando a la nanotecnología –junto a la biotecnología, la metalmecánica y las tecnologías de la información y la comunicación– como un área de vacancia. Tal impulso fue reforzado al año siguiente, cuando la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (SECYT) –actualmente con rango de Ministerio– implementó el Plan de Acción de Mediano Plazo (2005-2015) y el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2006. A través de ambos planes se redefinió a la investigación a escala nanométrica como un área estratégica, estimulando la interacción entre la investigación académica y el sector productivo mediante redes de cooperación que vincularon a grupos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI),<sup>10</sup> de la Universidad Nacional de General San Martín (UNGSM) y de la Universidad de Buenos Aires (UBA), con empresas como Unilever Argentina, Comandes, Akapol y la Cámara de Fabricantes de Pintura.

A estas acciones, promovidas desde el ámbito científico tecnológico, se sumó en el año 2006 el aval del Ministerio de Economía para la creación de la Fundación Argentina de Nanotecnología (FAN). Constituida en la primera institución gubernamental específicamente dedicada a la promoción y desarrollo de la investigación a escala nanométrica, la FAN recibió una inversión de 10 millones de dólares para sus primeros cinco años de funcionamiento. Dependiente del mencionado Ministerio, esta institución vincula, a través de su comité asesor, a buena parte de los actores científico tecnológicos del país –la SECYT, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), la Comisión Nacional de Asuntos Espaciales, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el INTI, la UBA y la empresa INVAP S.E.– y tiene por objeto: a) crear un inventario de las facilidades tecnológicas disponibles en el país para el desarrollo de nanotecnologías, b) consultar a la comunidad científico tecnológica sobre necesidades, oportunidades y estrategias de apoyo, y c) brindar información sobre la nanotecnología a potenciales usuarios y al público en general.

Esta institucionalización del campo se complementó, meses más tarde, con la creación del Centro de Nanotecnología de Argentina y Brasil, cuyo formato organizativo se inspiró en otras experiencias de cooperación internacional como el Centro Argentino Brasileño de Biotecnología y la Cooperación Latinoamericana

<sup>9</sup> Tal estrategia dio lugar a la consolidación de una red que integra a más de 12 universidades y centros de I+D y a un plan de acción tendiente a encuadrar las líneas de investigación que se venían desarrollando en programas I+D de mayor envergadura.

<sup>10</sup> En la década de 1980, el INTI desarrolló un microscopio de efecto túnel y logró las primeras imágenes de resolución atómica en América Latina.

de Redes Avanzadas (Programa Marco de Ciencia y Tecnología del Mercosur, 2006).

En lo que atañe al desarrollo académico de la investigación a escala nanométrica, cabe mencionar que los Proyectos para Áreas de Vacancia (PAV) promovidos por la SECYT propiciaron la conformación de tres redes de investigación que entre 2004 y 2007 recibieron una inversión estimada de 300 mil dólares y que han vinculado a instituciones como la CNEA, la UBA, la Universidad Nacional de La Plata y el CONICET. En este contexto, la CNEA, dedicada a la investigación y desarrollo en materia nuclear, comenzó a promover, a través del Centro Atómico Bariloche (CAB) y del Centro Atómico Constituyentes (CAC), la creación de un Centro de Nanociencia y Nanotecnología que tiene por objeto: a) coordinar las actividades en micro y nanotecnología llevadas adelante en la institución, y b) proponer estrategias para el desarrollo de micro y nanotecnologías adecuadas a sus capacidades y objetivos institucionales (CNEA, 2005).<sup>11</sup>

Este ámbito procura dar un marco institucional específico a las investigaciones que actualmente se realizan al interior de la institución. En particular, en la División de Resonancia Magnética, en la División de Bajas Temperaturas, en la División Metales, en el Laboratorio de Propiedades Ópticas, en el Grupo de Teoría del Sólido, en el Grupo de Superficies y en el Grupo de Caracterización de Materiales del CAB y en la Unidad de Actividad Física, en la Unidad de Actividad Materiales y en la Unidad de Actividad Química del CAC.

En la mayoría de los casos, estos grupos comenzaron a reorientar sus investigaciones hacia la nanoescala a comienzos de la década de 1990, estableciendo colaboraciones formales e informales con grupos nacionales y extranjeros que permitieron: a) estudiar, modelizar y fabricar sistemas nanoscópicos, b) utilizar nanopartículas para detectar e identificar moléculas orgánicas como anticuerpos y proteínas, c) caracterizar materiales con propiedades magnéticas blandas, y d) diseñar dispositivos magnetoelectrónicos. En el caso de los grupos de trabajo primordialmente experimentales, esta trayectoria ha permitido avanzar no solo en el desarrollo conceptual de fenómenos a escala nanométrica, sino también en el modelado de materiales y nanoestructuras susceptibles de ser aplicados a la fabricación seriada de sensores, al almacenamiento y procesamiento de datos y al tratamiento de residuos peligrosos, por mencionar algunos ejemplos.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> La creación del mencionado Centro ha sido impulsada por el Programa de Coordinación de Proyectos de Investigación y Desarrollo en Ciencias Básicas y por el Área de Ingeniería de la Gerencia de Tecnología y Medio Ambiente de la CNEA.

<sup>12</sup> Estos avances han sido plasmados en revistas internacionales como *Materials Science*, *Physical Review*, *Physical Review Letters* y *App. Physical Letters*. En este último caso, cabe mencionar, uno de los artículos publicados dio lugar a una nota en los "News and Views" de la revista *Nature* en el año 2004.

En gran medida, esto ha sido posible gracias a la disponibilidad de los instrumentos que hicieron de la manipulación atómica una realidad fácticamente posible al permitir analizar composicionalmente las nanoestructuras en cuanto a su tamaño, forma y estado de agregación: el microscopio electrónico de transmisión, el microscopio electrónico de barrido, el microscopio de efecto túnel y el microscopio de fuerza atómica.<sup>13</sup>

Incorporados a los laboratorios locales desde fines de la década de 1980, estos instrumentos parecerían haber contribuido a conformar en los grupos de investigación del CAB una “maquinaria epistémica” que, consistentemente con aquella representada por Richard Smalley, aborda el análisis y el diseño de materiales nanoestructurados mediante estrategias metodológicas que implican: a) el crecimiento y la síntesis de nanoestructuras en medios químicos –inmersión, evaporación, electrodeposición, autoensamblado– en el vacío y en atmósferas controladas, b) la nanoestructuración artificial mediante técnicas litográficas, c) el uso de matrices con nanoporos para la formación de nanohilos, y d) la modificación de superficies por bombardeo iónico.

En este sentido, cabría sugerir que la “cultura epistémica” de la investigación del nanomundo en el contexto local parece contar con una “maquinaria epistémica” que supone una organización sociotécnica del trabajo, la cual destaca no solo el rol epistémico de la interacción científico-artefacto, como ocurre en el caso de las “maquinarias epistémicas” ejemplificadas por Drexler y Smalley (Bueno, 2004), sino también la relevancia cognitiva que posee la integración de distintos institutos, facilidades experimentales y agentes financieros en colaboraciones de carácter nacional e internacional. De esta manera, la “maquinaria epistémica” local asume al carácter colectivo de la investigación como un rasgo necesario para el desarrollo de la actividad nanotecnocientífica. Un rasgo sin el cual no sería posible contar con las muestras –películas delgadas metálicas, aislantes y superconductoras, superredes, nanopartículas magnéticas de metales de transición, aleaciones y nanoestructuras de materiales superconductores, entre otras– que son analizadas en los laboratorios locales mediante instrumentos que, veremos más adelante, habilitan procesos de codificación del conocimiento basados en mecanismos analógico-digitales de detección y registro de señales.

A pesar de sus diferencias en cuanto a la técnica utilizada para amplificar las muestras y a las características que deben tener las mismas en relación con su tamaño o conductividad, los microscopios anteriormente mencionados permiten generar recursos representacionales visuales que, advertiremos a continuación,

<sup>13</sup> A estos instrumentos caben agregar otros que permiten realizar experimentos a escala nanométrica, entre ellos el espectrómetro de resonancia magnética y el magnetómetro.

diluyen la distinción establecida por Galison (1997) entre las “tradiciones de evidencia” del siglo xx.

A diferencia de los microscopios ópticos, los microscopios electrónicos de transmisión poseen una limitación de resolución que está dada no por la longitud de onda de la luz<sup>14</sup> sino por el tipo de lente utilizado. Ello se debe a que en lugar de utilizar fotones para formar imágenes se valen de electrones que, al poseer una longitud de onda menor a la de la luz, generan visualizaciones hasta 500 mil veces más grandes que las de los microscopios ópticos convencionales.

El primer microscopio electrónico de transmisión fue diseñado por Ernst Ruska y Max Knoll en 1930,<sup>15</sup> y cuatro años más tarde comenzaron a desarrollarse comercialmente. Básicamente, las señales registradas por estos instrumentos se obtienen a partir de un haz de electrones que es generado por un cañón electrónico. Mediante lentes magnéticas ubicadas en cámaras de vacío, este haz es aplicado sobre una muestra que debe ser preparada en capas no mayores a un par de miles de ángstrom. Como resultado de este proceso, los electrones atraviesan la muestra e impactan sobre una placa fotográfica o una pantalla sensible ofreciendo una imagen codificada en tonos blanco y negro, a la que se le pueden agregar otros colores mediante el procesamiento digital de las señales.

El microscopio electrónico de barrido opera de un modo similar pero, a diferencia de las imágenes bidimensionales generadas por el microscopio electrónico de transmisión, ofrece visualizaciones con profundidad de campo. Salvo los modelos desarrollados desde el año 2000 en adelante, este microscopio requiere que las muestras sean conductoras. Estas deben colocarse en un receptáculo con un alto vacío para que los haces de electrones puedan barrerla sin que se vean atenuados por la presencia de gases.<sup>16</sup>

El barrido de estos haces es registrado por un detector que proyecta imágenes tridimensionales en un monitor generando visualizaciones con una capacidad de aumento y de resolución mucho mayor a la del microscopio electrónico de transmisión.

<sup>14</sup> Por este motivo, los microscopios ópticos pueden ofrecer imágenes que si bien magnifican hasta mil veces el tamaño de una muestra, son incapaces de trascender el rango que va desde 1 mm a 1 micra.

<sup>15</sup> Por este desarrollo, Ruska recibió el premio Nobel en 1986, distinción a la que no pudo acceder Knoll quien falleció en 1969. Curiosamente, en 1925 Louis-Victor de Broglie publicó un trabajo sobre las propiedades ondulatorias de los electrones que, si bien resulta consistente con el desarrollo de Ruska y Knoll, no fue conocido por ellos hasta finales de la década de 1930.

<sup>16</sup> Esta limitación ha sido superada por el microscopio de transmisión con cañón de efecto campo, facilidad experimental que comenzará a operar en el CAB en el año 2009 y que, a diferencia del microscopio electrónico de barrido convencional, permite trabajar con atmósferas parciales y con muestras no conductoras –líquidos, por ejemplo– en escalas que van del micrón al nanómetro.

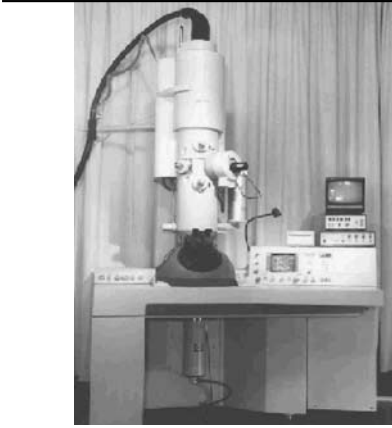


Figura 1. Microscopio electrónico de transmisión PHILIPD CM200 Ultratwin, Centro Atómico Bariloche.

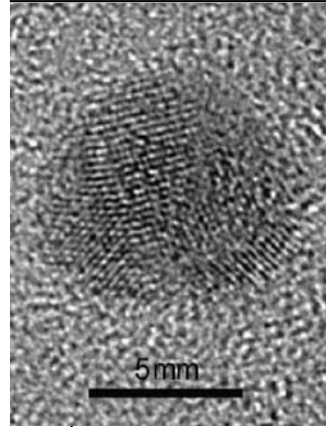


Figura 2. Visualización de una nanopartícula de oro generada por un microscopio electrónico de transmisión (imagen extraída de Granada y Troiani, 2007).



Figura 3. Microscopio electrónico de barrido (SEM) Philips 515, Centro Atómico Bariloche.

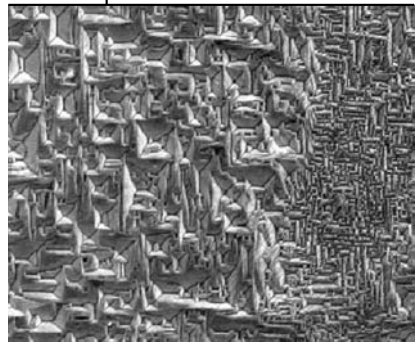


Figura 4. Visualización de una aleación generada por un microscopio electrónico de barrido (imagen extraída de Dutrús, 2006).

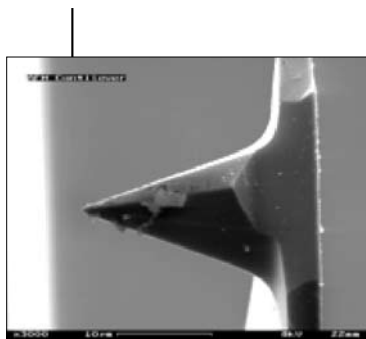


Figura 5. Aguja overthe, que identifica zonas de distinta densidad electrónica superficial para inferir la posición de átomos o moléculas (imagen extraída de Wolf, 2004).

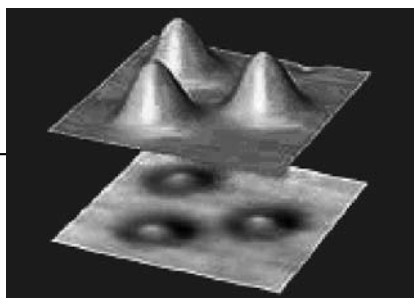


Figura 6. Imagen topográfica y de la conductancia de tres átomos de gadolinio sobre una superficie superconductora de niobio, generada mediante un microscopio de efecto túnel (imagen extraída de la National Science Foundation, <www.nano.org>).

Los microscopios de efecto túnel y de fuerza atómica representan una nueva generación de microscopios que se diferencia de la anterior en cuanto a la técnica de microscopía utilizada. El primero de ellos, desarrollado por Binnig y Rohrer en el laboratorio de IBM de Zurich, permite identificar individualmente los átomos de una superficie de metal o de materiales semiconductores mediante el escaneo de una aguja *overthe* que trabaja según un efecto cuántico que ocurre en escalas menores a 1 nanómetro.

Dicho efecto, denominado efecto túnel, refiere a la posibilidad de que un electrón contribuya a generar una intensidad eléctrica denominada “intensidad de túnel” al superar una barrera de potencial superior a su energía. Esta “intensidad de túnel” opera como un parámetro de control en la visualización de la topografía de las nanoestructuras que apenas alcanza los nanoamperios y es muy sensible a la variación de tensión entre la “aguja overthe” y la muestra. Por este motivo, el registro de señales debe ser controlado mediante un *software* computacional que genera una imagen en escala de grises a la manera de un mapa de densidades o de un mapa topográfico. Al igual que lo ocurrido en el caso de las visualizaciones generadas por los microscopios electrónicos, estas aparecen codificadas en tonos blanco y negro, a los cuales se les pueden agregar otros colores para mejorar el contraste y observar cambios en la muestra según variables como la temperatura, las propiedades magnéticas y/o el reposicionamiento atómico mediante técnicas de nanolitografía.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Debido al bajo costo de funcionamiento y de mantenimiento, este microscopio ha tendido a sustituir a los microscopios electrónicos tanto en los países centrales como en los periféricos.

Finalmente, el microscopio de fuerza atómica constituye una modificación del microscopio de efecto túnel, que posibilita el análisis de muestras no necesariamente conductoras. Con este propósito, Binning, Quate y Gerber sustituyeron el sistema de detección del microscopio de efecto túnel por una palanca óptica que permite realizar dos diferentes tipos de registro. Por un lado, un registro de imagen, para lo cual es necesario que dicha palanca barra horizontalmente la superficie de la muestra a fin de que la fuerza interatómica entre los átomos que la componen y los de la superficie muestral pueda ser registrada por un sensor. De este modo se obtienen visualizaciones de una superficie sin que intervengan efectos eléctricos, posibilitando, por ejemplo, el estudio de materiales no conductores. Por otro lado, el microscopio de fuerza atómica permite un registro de fuerza para lo cual es necesario que la palanca óptica oscile verticalmente a fin de que la fuerza interatómica entre los átomos que la componen y los de la superficie muestral pueda ser registrada por un sensor. Este tipo de registro es frecuentemente utilizado en estudios de fuerzas de adhesión dado que permite, por ejemplo, estudiar interacciones estructurales de biomoléculas o caracterizar la elasticidad de polímeros.

Como puede observarse, a pesar de sus diferencias en cuanto a la técnica de amplificación de imagen utilizada, estos microscopios coinciden en el hecho de generar recursos representacionales a partir de señales que son registradas computacionalmente mediante un código binario que reconfigura la muestra en conjuntos de píxeles. En virtud de ello, a diferencia de las representaciones visuales quiorráficas y tecnográficas generadas por los primeros científicos modernos y de aquellas visualizaciones fotoquímicas y fotoelectrónicas utilizadas ya a fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX, los recursos representacionales generados mediante estos microscopios poseen un sustrato lógico numérico que altera el carácter mimético de las visualizaciones científicas tradicionales. Ello se debe a que al permitir cambiar y/o integrar a la imagen distintos elementos –brillo, contraste, sombras, colores, y hasta otras figuras– configuran un objeto visual que termina siendo ontológicamente distinto a su referente en el mundo físico real.

Lejos de constituir una limitación, ello habilita un horizonte epistemológico que permite: a) tratar homogéneamente a las distintas señales que registra el detector, b) obtener registros de mayor precisión respecto a instrumentos meramente mecánicos, c) procesar los registros mediante diferentes *softwares* computacionales, y d) detectar y corregir posibles errores en la toma de datos. Así, aunque frecuentemente el análisis de nanoestructuras supone el registro de señales analógicas referidas, por ejemplo, a la tensión, la temperatura y la presión, la codificación digital de los resultados mediante este tipo de equipamiento permite generar imágenes que adquieren estatus de evidencia en un contexto donde,



trascendiendo la distinción entre las “tradiciones de evidencia” del siglo xx, se concilia la visualización, la clasificación y la manipulación simbólica.

Tal conciliación es posible en la medida en que los microscopios utilizados en la investigación a escala nanométrica permiten procesar las señales obtenidas mediante formatos que reorganizan la información de la muestra en gráficos que ordenan espacialmente el registro empírico según ejes cualicuantitativos que habilitan la clasificación y la cuantificación de patrones de ocurrencia. En este sentido, las estrategias metodológicas definidas por esta “cultura epistémica” suponen la combinación de distintos recursos representacionales visuales con el objeto de que el científico pueda ampliar la información, “hacer más evidente” eventuales relaciones entre los datos, y/o generar modelizaciones. A continuación, se ejemplifican los recursos representacionales visuales que pueden ser generados mediante técnicas de microscopía de barrido de puntas.

Si bien estos rasgos del registro y tratamiento de los datos resultan innovadores frente a aquellos procesos que dan lugar a los recursos representacionales visuales tradicionalmente utilizados como evidencia –tablas de datos, diagramas, gráficos x-y, entre otros (Arsenault, Smith y Beauchamp, 2006)– cabe destacar que las visualizaciones generadas por este tipo de microscopios comparten con aquellos recursos varias características. Así, unas y otros ofrecen la impresión de que el resultado es durable en el tiempo, desarrollan una concepción no intervencionista de la objetividad bajo el supuesto de que la agencia humana es aparentemente eliminada del proceso de generación de evidencia, permiten observar aspectos de la muestra que no serían visibles en otras circunstancias debido a su tamaño y grado de abstracción, generan nueva información a partir de la combinación de distintos recursos representacionales, pueden ser incorporados a distintos circuitos de difusión de conocimiento, y operan como recursos retóricos en la negociación del conocimiento (Latour, 1990).

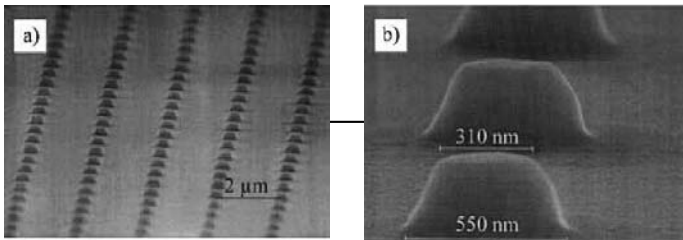


Figura 7. Visualización de nanomateriales, generada por técnicas de microscopía de barrido de puntas (imagen extraída de Wolf, 2004).

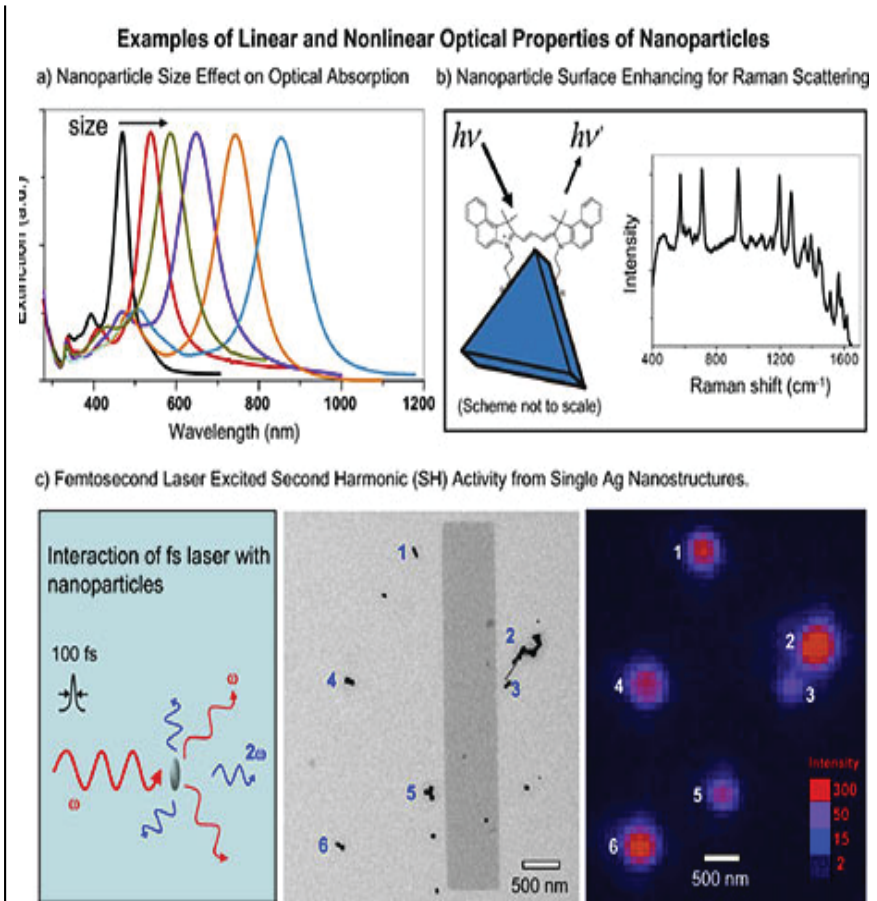


Figura 8. Visualización de propiedades ópticas de nanomateriales generada por técnicas de microscopía en asociación con técnicas de espectrometría (Rongchao Jin, Carnegie Mellon Institute, [www.chem.cmu.edu/groups/jin/images/optics.jpg](http://www.chem.cmu.edu/groups/jin/images/optics.jpg)).

## A MODO DE CIERRE

Como hemos visto, a pesar del proclamado carácter radicalmente innovador que para muchos parece poseer la investigación a escala nanométrica, es posible identificar en esta “cultura epistémica” varios puntos de contacto entre las “maquinarias epistémicas” que la impulsan y aquellas en torno a las cuales se configuraron las prácticas científicas del siglo xx. Tanto las visiones mecanicistas como los enfoques adaptativos de las nanoestructuras parecen establecer este vínculo en torno a concepciones ontológicas y epistemológicas que guardan relación con la

tradición mecanicista y la cibernética, en el primer caso, y con la biología evolucionista, en el segundo. Son, en cambio, las estrategias metodológicas configuradas por una y otra “maquinaria epistémica” las que permiten establecer un punto de inflexión respecto a las “tradiciones de evidencia” de la ciencia del siglo xx en la medida en que generan recursos representacionales que combinan aspectos de la tradición visual y la tradición lógica. En este sentido, un primer acercamiento a las prácticas de investigación desarrolladas en el ámbito local ha permitido advertir cómo la incorporación de instrumentos como el microscopio electrónico de transmisión, el microscopio electrónico de barrido y los microscopios de efecto túnel y de fuerza atómica ha dado lugar a un formato de codificación del conocimiento que, al diluir la distinción galileana entre propiedades primarias, cuantificables, y propiedades secundarias, cualificables, asume a la visualización y a la cuantificación como actividades cognitivas esenciales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS, BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES CONSULTADAS

- Arsenault, D., L. D. Smith y E. A. Beauchamp (2006), “Visual Inscriptions in the Scientific Hierarchy, Mapping the Treasures of Science”, *Science Communication*, N° 27, pp. 376-387.
- Ball, P. (2002), “Natural Strategies for the molecular engineer”, *Nanotechnology*, N° 13, pp. 15-28.
- Beaulieu, A. (2002), “Images Are Not the (Only) Truth: Brain Mapping, Visual Knowledge, and Iconoclasm”, *Science Technology Human Values*, N° 27, pp. 53-86.
- Bensaude Vincent, B. (2004), “Two Cultures of Nanotechnology?”, *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 10, N° 2, pp. 65-82.
- Bueno, O. (2004), “The Drexler-Smalley Debate on Nanotechnology: Incommensurability at Work?”, *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 10, N° 2, pp. 83-98.
- Comisión Nacional de Energía Atómica (2005), “Disposición 86/04, Proyecto Centro de Nanociencia y Nanotecnología de la Comisión Nacional de Energía Atómica”, Buenos Aires, 28 de junio de 2005.
- Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (2004), “Programa Estratégico para el Desarrollo Institucional”, <www.conicet.gov.ar>.
- Daston, L. y P. Galison (1992), “The Image of Objectivity”, *Representations*, N° 40, pp. 81-128.
- (2007), *Objectivity*, Nueva York, Zone Books.
- Dutrús, S. (2006), “Una mirada a las ciencias a través del microscopio electrónico de barrido”, División Nuevos Materiales y Dispositivos, Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica.

- Drexler, E. (1986), *Engines of Creation*, Nueva York, Anchor Books.
- (2001), “Machine-Phase nanotechnology”, *Scientific American*, pp. 66-67.
- Elkins, J. (1999), “Logic and Images in Art History”, *Perspectives on Science*, vol. 7, N° 2, pp. 151-180.
- Elkins, J. (2000), “Review of Jones, C. y P. Galison (eds.) (1998), *Picturing Science, Producing Art*, Nueva York, Routledge”, *Isis*, 91, pp. 318-319.
- Fundación Argentina de Nanotecnología (2005), “Decreto de creación, Poder Ejecutivo Nacional (380/05)”, <www.fan.org.ar>.
- Forbes (2004), *Nanotech Report*, vol. 3, N° 12, pp. 1-3, <www.forbesnanotech.com>.
- Galison, P. (1997), *Image and Logic*, Chicago, University of Chicago Press.
- Gooding, D. (2003), “Varying the Cognitive Span: experimentation, visualisation and computation”, en H. Radder (ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, pp. 255-283.
- Goodman, N. (1968), *Languages of Art*, Indianápolis, Bobbs-Merrill.
- Granada, M. y H. Troiani (2007), “Para captar el mundo muy pequeño: los microscopios electrónicos”, *Desde la Patagonia difundiendo saberes*, vol. 5, N° 6, pp. 32-36.
- Haching, I. (1983), *Representing and intervening*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial, <www.inti.gov.ar/pdf/inti-nanotecnologia.pdf>.
- Knorr Cetina, K. (1999), *Epistemic Cultures. How the Sciences Make Knowledge*, Cambridge, Harvard University Press.
- Latour, B. (1990), “Drawing things together”, en Lynch, M. y S. Woolgar (eds.), *Representation in scientific practice*, Cambridge, MIT Press.
- Lewis, D. (1971), “Analog and Digital”, *Noús*, vol. 5, N° 3, pp. 321-327.
- Lynch, M. (2002), “Visualization: Representation in Science”, *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, pp. 16.288-16.292.
- Marey, E. (1878), *Le méthod graphique dans les sciences expérimentales*, París, G. Masson Editeur.
- Meyer, M. y O. Kuusi (2004), “Nanotechnology: Generalizations in an Interdisciplinary Field of Science and Technology”, *HYLE: International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 10, N° 2, pp. 153-168.
- National Nanotechnology Initiative (2000), Executive Office of the President of the United States, National Science and Technology Council.
- Pichering, A. (1995), *The rangle of practice. Time, agency and science*, Chicago, Chicago University Press.
- Programa Marco de Ciencia y Tecnología del Mercosur (2006), “Declaración de Buenos Aires”, 30 de mayo de 2006. Reising, A. (2007), “Las prácticas nanotecnocientíficas como objeto de estudio”, en L. Salvático y P. García (eds.), *Epistemología e historia de la ciencia. Selección de trabajos de las XVII Jornadas*, Universidad Nacional de Córdoba, pp. 455-461.
- Reising, A. y R. Barrachina (2007a), “Uso de representaciones visuales en los estudios contemporáneos sobre sistemas dinámicos”, III Simposio Internacional La representación en la

ciencia y el arte, La Falda, Facultad de Filosofía y Humanidades y Facultad de Psicología de la Universidad Nacional de Córdoba, 25 al 28 de abril.

Reising, A. y R. Barrachina (2007b), "Las visualizaciones computacionales en las rutinas científicas contemporáneas: aspectos epistemológicos de nuevos formatos representacionales", XVIII Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia, La Falda, Escuela de Filosofía de la Universidad Nacional de Córdoba, 25, 26 y 27 de octubre.

Smalley, R. (1999), "Prepared written statement and supplemental material", Rice University, 22 de junio, <[http://www.house.gov/science/smalley\\_062299.htm](http://www.house.gov/science/smalley_062299.htm)>.

Staley, K. (1999), "Golden Events and Statistics: What's Wrong with Galison's Image/Logic Distinction?", *Perspectives on Science*, vol. 7, N° 2, pp. 196-230.

Whitesides G. (2001), "The Once and Future nanomachines", *Scientific American*, pp. 78-83.

Wolf, E. (2004), *Nanophysics and Nanotechnology*, Nueva York, Wiley-VHC.

Artículo recibido el 1° de diciembre de 2008.

Aprobado para su publicación el 1° de febrero de 2009.