

# Fenomenotecnia y sistemas experimentales en la comprensión de la práctica científica: el caso de la célula viviente

*Phenomenotechnique and Experimental Systems in the Understanding of Scientific Practice: The Case of the Living Cell*

 Juan Carlos Gallego-Gómez\*

 Germán Guerrero-Pino\*\*



\* Director del *Grupo de Medicina Molecular y de Translación*, y Profesor Titular de la Facultad de Medicina, Departamento de Microbiología y Parasitología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: carlos.gallego@udea.edu.co

\*\* Director del Grupo de investigación *Episteme: Filosofía y Ciencia*, y Profesor Titular del Departamento de Filosofía, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo electrónico: german.guerrero@correounivalle.edu.co

Fecha de recepción: 19 de septiembre de 2020

Fecha de aceptación: 19 de febrero de 2021

## Cómo referenciar / How to cite

Gallego-Gómez, J. C.; Guerrero-Pino, G. (2021). Fenomenotecnia y sistemas experimentales en la comprensión de la práctica científica: el caso de la célula viviente. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, v. 13, n. 25, e1761. <https://doi.org/10.22430/21457778.1761>

**Resumen:** el presente artículo tiene por objetivo precisar la concepción de los sistemas experimentales de Rheinberger dentro del contexto del concepto de fenomenotecnia de Bachelard, para después mostrar su utilidad en el análisis y comprensión de un caso particular, como es la emergencia del objeto epistémico, «célula viviente», en la biología celular contemporánea. En este último caso, se parte de sus orígenes con la teoría celular, la citología y la bioquímica, hasta llegar a sus más recientes desarrollos basados en imagenología de células vivas. En relación con la noción de sistema experimental, se plantea que estos incluyen objetos epistémicos o científicos y condiciones experimentales, así como coyunturas, hibridaciones y bifurcaciones. La concepción de sistema experimental de Rheinberger, es una caracterización más fina de la ciencia contemporánea que atrapa un elemento central de la actividad investigativa: el surgimiento del objeto científico-epistémico (célula viviente) cogenerado entre un espacio de representación y un grafema (un rastro experimental que deja significantes) dentro de un sistema experimental llamado imagenología de células vivas. Finalmente, en el contexto de los recientes trabajos en estudios sobre ciencia, tecnología y sociedad, también se busca mostrar cómo es posible integrar las reflexiones filosóficas con la práctica científica, como sucede realmente en el laboratorio, que está bastante ausente en los actuales trabajos sobre filosofía de la ciencia.

**Palabras clave:** célula viviente, imagenología, fenomenotecnia, sistema experimental.

**Abstract:** This article aims at clarifying Rheinberger's conception of experimental systems in the context of Bachelard's concept of phenomenotechnique to show its usefulness in the analysis and understanding of a particular case: the emergence of the epistemic object, "living cell", in contemporary cell biology. In this case, the starting point is cell theory, cytology and biochemistry, up to the most recent developments based on live cell imaging. According to the notion of experimental system, it has been argued that it includes epistemic or scientific objects and experimental conditions, as well as junctures, hybridizations and bifurcations. Rheinberger's conception of experimental system is a finer

characterization of contemporary science, involving a central element of research activity: the emergence of the scientific-epistemic object (living cell) co-generated between a representation space and a grapheme (an experimental trace that leaves signifiers) within an experimental system called living cell imaging. Finally, in the context of recent studies on science, technology and society, we also seek to show how it is possible to integrate philosophical reflections with scientific practice, as it actually happens in the laboratory, something rare in current works on philosophy of science.

**Keywords:** Living cell, imaging, phenomenotechnique, experimental system.

## INTRODUCCIÓN

*Así, todo dependía de la representación que formábamos de un proceso invisible y de la forma de su translación en efectos visibles*

François Jacob (1988)

El proceso dinámico en células vivientes, como se puede estudiar en este nuevo milenio (imagenología de células vivas [ICV]), es el producto de una larga tradición investigativa y su esclarecimiento se ajusta muy bien a la nota textual del Nóbel francés François Jacob, con que iniciamos.

Una revisión rápida de los más recientes trabajos histórico-filosóficos en biología celular contemporánea (BCC) o en biología molecular (BM) (Bechtel, 2006; Rheinberger, 1997a; Morange, 1998; Harris, 2000), mostrará algunas características comunes con otras disciplinas biológicas y de las ciencias físicas. Tales textos son más cercanos a los estudios sobre ciencia, tecnología y sociedad (CTS) y al giro práctico pospositivista de la filosofía de la ciencia, en contraste con trabajos sobre historia y filosofía de la teoría evolutiva (Weber, 2004) o la física, en donde predominan más las indagaciones centradas en teorías.

Aunque el giro práctico de la ciencia suele localizarse en la década de los ochenta, tiene antecedentes de tiempo atrás como lo avizoró Buchdahl (1965):

... ya no tendremos la tentación de mirar los logros científicos del pasado simplemente desde el punto de vista de la ciencia actual de los libros de texto; nos preocupará más verlos en términos de problemas, ideas, trasfondos tecnológicos de su época (p. 56).

Además, si bien es comúnmente reconocido Ian Hacking como el pionero del giro práctico de la ciencia, fue Robert Ackermann quien dio el nombre de «Nuevo Experimentalismo» a las discusiones filosóficas enfocadas en el rol de los experimentos y los instrumentos en la ciencia, que en consecuencia intentaron superar los inconvenientes del empirismo lógico y evitar así el escepticismo de los constructivistas sociales (Ackermann, 1989; 2016). Los nuevos experimentalistas (Boon, 2015) se centran más en experimentos e instrumentos de la práctica científica, siendo clave esta postura para evitar, entre otras cosas, los problemas de la subdeterminación de la teoría por la experiencia, la carga teórica de la observación y el escepticismo extremo del constructivismo social.

Tanto los estudios CTS como los nuevos experimentalistas sostienen que la objetividad científica es un producto histórico (Daston & Galison, 2007) proveniente de comunidades epistémicas socialmente situadas (Knorr Cetina, 1999) y que el conocimiento científico es construido; de modo que, con base en los últimos desarrollos de la filosofía de la ciencia basada en prácticas (Martínez & Huang, 2015), es indispensable tomarse en serio lo que esta investigación ha estado mostrando en las últimas décadas.

Bachelard (2004a) dijo que «Nada está dado. Todo se construye» (p. 16), y usaba más el término *realization* (Rheinberger, 2010), bastante aproximado a *reification*. Sin existir una tajante dicotomía entre teoría y experimento, sino más bien una especie de amalgamamiento desde la cual se asume la generación de conocimiento científico, el término *teorema reificado* (Rheinberger, 2010) de Bachelard es un neologismo para tal fusión.

Aunque una cantidad importante de los estudios filosóficos de la ciencia, que se toman en serio el giro práctico y el nuevo experimentalismo, hacen mucho énfasis en su distanciamiento de una filosofía de la ciencia dominada por teorías, muchas de sus argumentaciones conducen a explicaciones de la vena conceptualista centrada en teorías, y aunque la práctica científica se asume como un factor clave, no se usan datos de lo que constituye la «vida experimental», como la denominaron Shapin y Schaffer (2005). Excepciones a ello son los trabajos filosófico-historiográficos de Weber, Bechtel y Rheinberger, mencionados anteriormente. En particular, en las ciencias de la vida, la investigación no es dirigida por teorías, como dice Lenoir en su prólogo al libro de Rheinberger (2010):

... es conducida en las fronteras entre lo conocido y lo desconocido a través de la construcción de sistemas experimentales que dan origen a las ‘cosas epistémicas’; sino más bien dominada por la selección de sistemas experimentales: ‘Lo ideal es construir un arreglo experimental robusto de instrumentos, procesos químicos, estructuras físicas y materiales biológicos, para generar una red de experimentos’ (p. xiii).

Se requieren más estudios sobre cómo se dan las prácticas científicas en el laboratorio, porque aún quedan procesos interesantes por articular en la indagación filosófica. Por esto, hay que enfocarse en un período histórico reciente (1990-2010) en la biología e investigación biomédica, que ha sido muy novedoso

y profusamente usado (Landecker, 2009). De modo que, siguiendo el ejemplo de Bechtel y Rheinberger, se usarán datos de los últimos dos decenios en el desarrollo de la BCC, que terminó en la creación de la ICV, una práctica científica en la que confluyen investigadores de distintas áreas en ciencias de la vida y de la salud.

De otra parte, como se intenta mostrar en este trabajo, la historia de la ICV puede ser mejor analizada partiendo del supuesto que son los sistemas experimentales (SE) los que se van ensamblando de manera diferencial y confluyen en la constitución (coyuntura) del objeto epistémico-científico. El estudio histórico de la ICV, usando los SE, ofrecerá una perspectiva distinta sobre la historia y filosofía de la ciencia biológica, porque se mostrará cómo dos tradiciones (estructuralistas y funcionalistas), con siglos de antigüedad, que terminaron convergiendo en un proceso de hibridación del cual emergió un nuevo objeto epistémico: la célula viviente.

Las células vivas fueron el supuesto ontológico con el que trabajaron los investigadores durante años desde la década del 30 del siglo XIX, pero ahora, con el SE novedoso de la ICV, existe una observación extendida del fenómeno viviente, porque se pueden registrar eventos a nivel molecular, con el detalle de la dinámica modelada matemáticamente como nunca había sido posible en la historia. Así, se espera que este trabajo ofrezca herramientas de la filosofía y la historia usando la metodología de Rheinberger para comprender de manera distinta cómo se construyen fenómenos en el laboratorio y por qué se dice que los experimentos tienen vida propia, algo que se cumple en el caso de la ICV.

## Fenomenotecnia y sistema experimental

El término *fenomenotecnia* (FT) fue introducido por Bachelard (2004b) para caracterizar la ciencia a finales del siglo XIX, en contraste con la ciencia anterior. Mientras que Rheinberger (1997a) usa sistema experimental (SE) inspirado, en parte, en el concepto anterior de Bachelard. A continuación, cada uno de estos conceptos por separado y la relación que guardan entre sí.

Bachelard (2004b) presenta el concepto de fenomenotecnia contrastándolo con el de fenomenografía, del siguiente modo:

La física matemática corresponde entonces a una noumenología muy diferente de la fenomenografía en la que pretende acantonarse el empirismo científico. Esta noumenología explica una fenomenotécnica<sup>1</sup> por la cual fenómenos nuevos son, no simplemente hallados, sino inventados, construidos de arriba abajo (p. 24).

La física de comienzos del siglo XX, la microfísica o física de partículas, se ocupó de investigar la estructura interna de la materia, de los objetos que tenemos a nuestro alcance por los sentidos, proponiendo o conjeturando la existencia de diminutas partículas y sus interacciones a las que no podemos acceder por los sentidos sino a través de complicados montajes experimentales y de medición, fundados en teorías matemáticas y en desarrollos experimentales y tecnológicos. Por contraste, y en términos generales, la física anterior se había ocupado de los objetos y fenómenos de la experiencia cotidiana. La descripción de estos últimos fenómenos, de acuerdo con Bachelard, es lo que conforma la fenomenografía; y si asumimos, como hace el empirismo científico, que estos objetos y fenómenos no solo nos son dados, sino que existen por sí mismo, son noumenos (en términos kantianos), fenomenología que a este nivel equivale a la noumenología.

Ahora bien, la FT refiere a los fenómenos microscópicos y atómicos, que no nos son dados y no se encuentran directamente en la naturaleza, sino que son «inventados, construidos» en circunstancias especiales en un laboratorio; y la noumenología son las entidades y propiedades conjeturadas por científicos que explican la FT. En síntesis, como explica Chimisso (2008), Bachelard (2004a) consideró bizarra la visión según la cual la ciencia es sobre «cosas» que existen independientemente de nuestro conocimiento; por eso, en vez de refutarla filosóficamente, decidió psicoanalizar esas posturas. Esto es lo que refleja el subtítulo de su libro, *Contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo*.

Torretti (2012) insiste en dos aspectos del concepto de FT, primero «los objetos del conocimiento científico – cosas, atributos, situaciones, procesos – *no son dados sino constituidos*, articulados en el flujo del devenir por nuestro propio pensamiento. En una palabra: la objetividad es un logro, no un dato». Por la otra, que la raíz «fenómeno» φαίνεσθαι, de FT, significa aparecer, manifestarse, hacerse presente;

<sup>1</sup> Este término es el que aparece en la traducción al español y es utilizado por académicos hispanohablantes (Gómez Mata, 2013), pero preferimos el término fenomenotecnica, que es la traducción que hace Torretti (2012) del original en francés. Torretti, además, hace un examen etimológico del término, mostrando que la raíz griega «tecnia», muy usada en lenguas modernas, corresponde a τέχνη, lo cual significa habilidad manual, destreza práctica, o arte sabio; y que el sufijo '-tecnia' es de amplio uso en otras acepciones como en 'pirotecnia' o 'electrotecnia'.

entonces, por FT no se debería entender el fenómeno en la acepción tradicional de los filósofos como «lo que aparece a la conciencia», sino como lo entienden los científicos, para quienes un fenómeno es un suceso o proceso tipificable y reproducible, desglosable del devenir. En síntesis, «en el uso bachelardiano, ‘fenomenotecnia’ significa *arte sabio de producir nuevos fenómenos*, realizando material y manualmente lo concebido en abstracto – típicamente mediante modelos matemáticos – por la inteligencia» (Torretti, 2012, p. 98).

El nóúmeno es un concepto fundamental en la filosofía bachelardiana (Bachelard, 2004b) y «nóúmeno» (νοούμενον), en griego, en su más simple y literal acepción, es «lo captado con la inteligencia (νοῦς)» (Torretti, 2012, p. 98). Además, no hay puntos de origen y final discernibles para determinar dónde empieza el nóúmeno y dónde el fenómeno, bajo la noción de FT de Rheinberger (2005):

... lo que tiende a ser percibido como un hecho, como algo dado en el mundo real, tiene que ser visto como resultado e incluso su existencia deriva de un circuito que es a la vez material y discursivo. (...) Este circuito material-discursivo está dialécticamente constituido. No tiene un punto de partida claramente definible ni en el lado nouménico ni en el fenoménico. -en parte cosa, en parte teorema- el cual los filósofos de la ciencia deberían tomar seriamente. Tal circuito simultáneamente material-discursivo es para Bachelard dialécticamente constituido (p. 316).

De otra parte, la postura productivista de Bachelard se resume en que «los conocimientos son productos tecno-epistémicos fundidos en la especial forma de teoremas incorporados» (Rheinberger, 2010). Los objetos de las ciencias no son inmediatamente dados, no son entidades para ser capturadas directamente o sin mediación, son siempre productos elaborados en el trabajo científico previo. Así, un objeto científico es un fenómeno que ha sido arrastrado a un proceso de «rectificación», pero no se constituye de una vez por todas, sino que continúa siendo un objeto científico en virtud de su constante reconfiguración y rectificación (Rheinberger, 2010).

Pero también los instrumentos científicos son clave, porque están en la médula del ensamblaje epistémico de la ciencia moderna porque incorporan conocimiento adquirido, y además contribuyen a producir el objeto como un tecnofenómeno: «el instrumento no es un aparato pasivo, ...sino que es verdaderamente un teorema reificado» (Rheinberger, 2010, p. 31) y representa la existencia material



de un determinado cuerpo de conocimientos. Aún más, un concepto sólo llega a ser científico cuando se convierte en o llega a ser una técnica, o tan pronto es acompañado por una técnica que lo hace real («realiza»), en el cual el objeto mismo llega a ser un agente del proceso de conocimiento.

Si bien los planteamientos filosófico-históricos de Rheinberger<sup>2</sup> descienden de la filosofía continental francesa y alemana (Husserl, Heidegger, Derrida, Foucault, Deleuze, Lacan y otros) (Lenoir, 2010), la médula de su concepción de SE y de «cosa epistémica» provienen fundamentalmente de la filosofía de Bachelard, de su epistemología histórica (EH) y, especialmente, de su comprensión de la ciencia contemporánea como FT<sup>3</sup>. Ahora bien, se puede decir que en cierto sentido los planteamientos de Rheinberger son un desarrollo de los Bachelard; más precisamente se entienden como una caracterización más fina de la ciencia contemporánea que la dada por Bachelard. En otras palabras, el concepto de SE atrapa un elemento central de la actividad investigativa, que es caracterizada en términos generales como fenomenotecnia por Bachelard.

Rheinberger (1997a) propuso que un SE contiene dos elementos inseparables, aunque discernibles: objetos de investigación u objetos científicos o «cosas epistémicas», y las condiciones experimentales o técnicas que contienen los objetos científicos. El primer componente pueden ser entidades materiales o procesos, como reacciones químicas, funciones biológicas o reacciones enzimáticas, que constituyen los objetos de indagación. Además, esos objetos epistémicos presentan una «vaguedad irreducible», que podría ser aparentemente paradójica; pero lo cierto es que «las cosas epistémicas incorporan lo que aún no conoce» o tienen el precario estatus de estar ausentes en la realización experimental (Rheinberger, 1997a). El segundo componente, las condiciones experimentales, y en contraste con la vaguedad irreductible de los objetos epistémicos, tienden

<sup>2</sup> Rheinberger (1997a) explica cómo un grupo de bioquímicos y oncólogos liderados por Paul Zamecnik, desarrollaron el sistema experimental para sintetizar proteínas en tubo de ensayo, entre los años 1945 y 1965, que luego resultaron decisivos en el origen de la biología molecular (BM). Este trabajo de Rheinberger tuvo un impacto sin precedentes en la década siguiente a la publicación de su libro porque alcanzó áreas más allá de la historia y la filosofía de la ciencia a las que estaba orientada, tales como sociología, antropología, economía y literatura (Lenoir, 2010).

<sup>3</sup> El trabajo histórico y filosófico de Bachelard fue intensamente criticado en los tardíos años 70, cuando los estudios sobre la ciencia, liderados por Bruno Latour, sacaron la noción de «tecnociencia» y se despertó un inusitado interés por el «hacer ciencia» (Rheinberger, 2010). Pero, sobre todo, las críticas surgieron para la *Formación del espíritu científico*, porque ahí Bachelard postuló los obstáculos epistemológicos que deberían superarse desde un pensamiento precientífico a uno propiamente científico, privilegiando al segundo sobre el primero.

a ser característicamente determinadas dentro de estándares dados de pureza y precisión. Estas contienen los objetos científicos en el doble sentido de que los incorporan y, a través de su propio abarcamiento, los restringen y limitan.

Si se asume que un SE es el núcleo de la estructura y la dinámica de la actividad científica, se tendrán consecuencias epistemológicas e historiográficas importantes: primero, se entenderá cómo lo que es desconocido llega a ser conocido y, segundo, que tal alcance se obtiene mediante un SE y no con cambios de teorías.

En un trabajo posterior, Rheinberger explica que la noción de «sistema» indica que entre los elementos de la cultura material de las ciencias existen conexiones bastante flexibles, que requieren ser estudiadas con más detalle para cada contexto histórico. Entre estos habría un «acoplamiento» laxo (usando la expresión de Fleck, 1986) y de doble dirección. Existen sincrónicamente con respecto a los elementos técnicos y orgánicos que entran en un SE y existen de forma diacrónica con respecto a la persistencia temporal, es decir, la existencia de un SE tiene una trayectoria histórica de investigación generalmente limitada, aunque persiste en el tiempo. La ventaja del concepto de SE radica en su facultad de pensar y unir aspectos esenciales, pero muy diferentes y heterogéneos del proceso de investigación científica, tales como instrumentos y aparatos de medición, arreglos experimentales de diferentes tipos, habilidades necesarias para usar todo esto de manera significativa, los objetos de investigación y, no menos importante, los espacios en los que todo esto se lleva a interactuar entre sí de manera productiva y creativa (Rheinberger, 2011).

Se considera que esta forma de ver los SE está alineada y es complementaria con Pickering (1995) de pensar la práctica científica en términos performativos (y no representativos), como «un campo de poderes, capacidades y representaciones, situado en capturas ‘maquínicas’ de agencia material» (p. 7). Si bien aquí el tema de la práctica de la representación está más focalizado en el aspecto epistémico-ontológico, en la constitución del objeto epistémico, acorde con Lynch y Woolgar (1990), llamando a ubicar la representación en la práctica científica y sus contextos específicos junto con los materiales de investigación, y no entenderla en el sentido abstracto y mental, que era el usual y dominante.

Adicionalmente, Coopmans et al. (2014) van mucho más allá al tener como objetivo «identificar cuestiones claves sobre la representación en la práctica científica, tales como preocupaciones, componentes, mecanismos o características animadas, que

iluminan y permiten la reflexión sobre los desarrollos recientes en CTS» (p. 4) y al considerar la representación (aunque próxima al concepto de visualización), no de manera unívoca, sino en una gran diversidad de prácticas científicas, abarcando diversos escenarios empíricos, analizados desde la antropología, la sociología, la filosofía, la historia y campos interdisciplinarios. En este punto caben las consideraciones de Rheinberger (1995b) sobre lo problemático que es la representación en la investigación científica, en contraste con el conocimiento ordinario, pero que se complementan con la forma como él entiende la construcción del objeto epistémico:

Involucrarse en la producción de cosas epistémicas significa involucrarse en la producción potencialmente interminable de trazas<sup>4</sup>, donde el lugar de la referencia siempre está ocupado por otro rastro... No hay representación sin una cadena de representaciones... la actividad de la representación científica debe concebirse como un proceso sin 'referente' y sin 'orígenes' (p. 51).

Rheinberger responde a qué significa hablar de SE en contraste con esa imagen de corte claramente racionalista de la experimentación, como una actividad dirigida por teorías, en estos términos: que un científico experimental está inmerso en un sistema de experimentos que usualmente no está bien definido y que, además, no produce respuestas claras. Esto resulta apoyado por Fleck (1986)<sup>5</sup>, quien ilustra esta naturaleza dinámica e inacabada de la experimentación científica, así:

Si un experimento de investigación fuera claro, entonces sería totalmente innecesario, pues para configurar claramente un experimento se tiene que conocer por adelantado su resultado, de lo contrario no se le puede delimitar ni determinar. Cuanto más desconocido y cuanto más nuevo es un campo de investigación, menos claros son los experimentos (p. 133).

En este orden de ideas, la postura de Rheinberger (1997a) contrasta con la larga tradición en filosofía de la ciencia, donde los experimentos fueron vistos como algo

<sup>4</sup> Rheinberger (1997a) usa esta concepción de traza, según la cual es «un significante experimentalmente producido que llega a ser parte de un objeto científico» (p. 246). Esta concepción es desarrollada a partir del deconstruccionismo de Derrida (1978) y Deleuze (2002).

<sup>5</sup> El contemporáneo de Popper, olvidado por mucho tiempo, nos recuerda Rheinberger (1997<sup>a</sup>), y quien llamó la atención sobre la manufactura de las prácticas científicas en la investigación biomédica del siglo XX.

empírico, singular, bien definido y embebidos en la elaboración de una teoría: «un investigador por regla no trabaja con experimentos aislados en relación con una teoría, sino más bien que el arreglo experimental diseñado como un todo, produce conocimiento que no está todavía a su disposición» (Rheinberger, 1997a, p. 27) y, en segundo lugar, un SE no es un dispositivo disyuntivo de confirmación o refutación de hipótesis como lo propuso Popper, pues en este los objetos o cosas epistémicas son creadas, generadas o, más bien, constituidas. Por ello, no hay objetos científicos previos o dados, del mismo modo que tampoco están definidas las preguntas de investigación<sup>6</sup>.

En síntesis, un SE puede ser visto como la más pequeña e integral unidad de trabajo de la investigación, designado para dar respuestas desconocidas a preguntas aún no formuladas claramente por investigadores. No es simplemente un dispositivo experimental para generar respuestas, es un vehículo para materializar preguntas, que inextricablemente cogen los fenómenos, o entidades materiales, y los conceptos que incorpora (Rheinberger, 1997a).

Tampoco el SE puede ser considerado como una forma de representación científica, que más bien está incluida dentro del mismo, porque como lo define Rheinberger (1997a) en su glosario, un SE es la «unidad básica de actividad experimental que combina aspectos locales, técnicos, instrumentales, institucionales, sociales y epistémicos» (p. 238). Para escapar a las dos metanarrativas (empirismo y racionalismo) que surgieron de la Ilustración, y las derivaciones en el siglo XX a las que condujeron (como representación científica), Rheinberger articula una

<sup>6</sup> Rheinberger (1997a) recurre a anécdotas o registros históricos de grandes investigadores que subrayaron la importancia de la experimentación en el mismo sentido que él pretende, a continuación, se referencian varias de tales fuentes y las páginas donde las cita Rheinberger. En biología molecular, está el llamado cielo de Hershey (citado en Hodgkin, 2001) «conseguir un experimento que funcione y lo siga haciendo todo el tiempo»; y la afirmación de Jacob (1988): «en biología, cualquier estudio empieza con la elección de un sistema» (p. 25). También menciona el trabajo de Goethe, de 1793, sobre experimentos ópticos para su teoría de los colores, que lleva el título revelador *El experimento como mediador entre el objeto y el sujeto*, y el hecho de que Kittler (1992) llamó *Aufschreibesystem* (sistema de registro) a la tarea que hacen los científicos de seguir «cada experimento individual a través de sus variaciones es la tarea real del investigador científico» (p. 26). Alfred Hershey implementó con Martha Chase un sistema experimental elegante y sencillo con bacteriófagos (virus que atacan bacterias), para demostrar empíricamente que la materia hereditaria residía en los ácidos nucleicos y no en las proteínas, usando marcajes isotópicos diferenciales. Constituye uno de los ejemplos históricos de los orígenes de la biología molecular en la postguerra al hacer uso no bélico de la radiactividad. De otra parte, Francois Jacob y Jacques Monod, ambos investigadores franceses, en una serie de elegantes ensayos postularon la unidad de regulación de la expresión de genes (operón Lac), usando el sistema experimental de bacterias, entendiendo cómo sustancias del medio de cultivo pueden «encender o apagar» genes de acuerdo con las necesidades metabólicas de las bacterias. Por cierto, el operón Lac sería una cosa epistémica u objeto científico de Rheinberger como será visto más adelante.

novedosa concepción acorde con la noción de teorema reificado bachelardiano junto con las aproximaciones del deconstructivismo francés de Derrida y Deleuze.

Para Rheinberger (1997a), las cosas epistémicas o científicas, cuyas características desconocidas son el blanco de la indagación experimental, tales cosas u objetos científicos son, sobre todo, articulaciones de grafemas, siendo éstos cualquier clase de significante material. En consecuencia, en un SE surgen trazas que son significantes materiales producidos experimentalmente, y a ese proceso le denomina inscripción, o sea a la producción de trazas experimentales con la ayuda de instrumentos científicos y otros dispositivos.

Ahora bien, al sistema coordinado en donde los objetos científicos llegan a ser instanciados como articulaciones de trazas lo llama 'espacio de representación' (Rheinberger, 1997a, p. 235), que existen en íntima correlación con los grafemas. Aclara, además, que «los grafemas y los espacios de representación no existen independientemente, porque se engendran mutuamente de tal manera que no hay un espacio de representación previo al grafema». Así, un «objeto científico investigado en la estructura de un sistema experimental es articulado a partir de las trazas materiales o grafemas de un espacio de representación particular» (Rheinberger, 1997a, p. 105). Por eso,

Las articulaciones de grafemas o sistemas de significación dentro de los límites de una configuración experimental constituyen los objetos de la ciencia. Ellos canalizan el ruido producido por el arreglo de investigación y lo trasladan hacia adicionales trazas, grafemas, inscripciones o marcas (Rheinberger, 1997a, p. 106).

Rheinberger (1997a), tanto en su libro, como en otros trabajos (1994, 1995a, 1995b, 1997b, 2011), hizo una extensión de la FT de Bachelard, concibiendo al SE como un proceso dialéctico en un devenir histórico. Con ejemplos específicos, logró configurar tres maneras mediante las cuales los sistemas experimentales cambian: reproducciones, bifurcaciones y coyunturas. En lo que sigue, usaremos de manera articulada esta forma en que cambian los SE y su taxonomía en algunos ejemplos de la BCC y de la ICV.

## Imagenología de células vivas

Un recorrido por diferentes épocas, desde los inicios del descubrimiento de las células por Hooke en el siglo XVII (Harris, 2000), al origen y consolidación de la teoría celular (TC) en el siglo XIX, pasando por los nuevos desarrollos del siglo XX, hasta llegar a la BCC de los años sesenta que abrieron el camino a la ICV, mostrará algunas características que será importante tener en cuenta.

Primero, serán notables tanto cambios conceptuales como técnicos, compatibles con las posturas de Rheinberger y Bachelard explicadas anteriormente. El concepto de célula, por ejemplo, aunque existió desde su descripción en 1660 por Robert Hooke, realmente no hacía alusión a la entidad ontológica, que luego tuvieron entre su práctica experimental los investigadores casi 150 años después (Harris, 2000). Así, la célula sería el objeto científico (cosa epistémica) que se obtuvo luego de esta larga trayectoria histórica de investigación, que se expondrá a continuación, resaltando solamente los aspectos que se consideran más adecuados para articularlos con los SE de Rheinberger.

Parafraseando a Rheinberger (1997a), se halla su relevancia en la historia de la biología celular temprana, articulando nuestro estudio de caso (entre paréntesis y en negritas) dentro sus afirmaciones algunos de tales hechos históricos, «... es a través de los SE [microscopios, métodos de preservación, fijación y tinción de células, ilustración de las observaciones] que objetos de investigación [célula viviente] llegan a ser atrincherados y articulados en un campo más amplio de prácticas epistémicas y culturas materiales» (p. 27) [solo hasta el siglo XIX las células llegaron a ser una entidad reconocible por los pioneros de la teoría celular].

En las primeras observaciones microscópicas, realizadas entre 1620 y 1750, se hallaron artefactos ópticos (aberraciones cromáticas y esféricas), con dificultades técnicas importantes, como el desconocimiento de métodos de preservación, fijación y tinción de células, y los hallazgos se fueron interpretados bajo las teorías fibrilar y globular, pero realmente no hay evidencia que estuvieran observando células (Harris, 2000); por ejemplo, Robert Hooke, cuando describió sus «células» hacía referencia a los espacios vacíos en los cortes del corcho, pero realmente no estaba observando células, ya que confundió los vasos conductores que contienen la savia con células (Brockliss, 1992).

Realmente, desde principios del siglo XVII, pasando por las primeras descripciones de células de finales del siglo XVIII, hablando en terminología de Rheinberger, no existían SE propiamente dichos, porque no habían logrado «realizar» el *objeto epistémico-científico*, célula del arreglo experimental. Para aquella época no existía el SE porque los microscopistas aún no habían definido las *condiciones experimentales*, reflejándose en el hecho que algunos investigadores representaban fibras musculares como una sucesión alargada de glóbulos o cuentas de rosario (Albarracín Teulón, 1983), porque se adherían a la doctrina globular y no a la fibrilar (Harris, 2000; Goss, 1937). Cuando lograban observar células las confundían con los núcleos y no eran claros los límites de la célula (membrana celular). Esta confusión persistió hasta el siglo XIX, cuando Dujardin (1835), Purkinje (1839) y von Mohl (1846) delimitaron y propusieron la nomenclatura para los contenidos de la célula (Harris, 2000), gracias al progreso en el pulimiento de lentes para microscopía que evitaban las aberraciones cromáticas y esféricas, con lo cual la presencia de artefactos celulares se limitó en gran medida.

Pero fue realmente en 1792, cuando el fisiólogo Italiano Stefano Gallini (1756–1836) habló primero de «célula» como una estructura individual en su libro *Saggio d'osservazioni concernenti li nuovi progressi della fisica del corpo umano*, y que Bruhn (2011) atribuye al progreso en la fabricación de lentes y el escrutinio de los más finos detalles.

En los años de 1830, hay una convergencia de investigaciones reportadas por diferentes investigadores para generar los postulados centrales de la teoría celular (Mazzarello, 1999). Esta convergencia de prácticas sería, en términos de Rheinberger, *la hibridación de SE*, porque *condiciones experimentales* y *objetos epistémico-científicos* un poco diferentes, provenientes de distintas áreas de investigación (plantas y animales), convergieron para dar por sentada la teoría celular, con lo cual se terminó de consolidar el *objeto epistémico-científico* (célula). A continuación, se mostrará más detalladamente estos hechos históricos para ver cómo se articulan desde la postura rheinbergeriana.

## Coyunturas, hibridaciones y bifurcaciones

Los SE, además de reproducirse en las trayectorias históricas de investigación<sup>7</sup>, también deben diferenciarse permanentemente en sus ciclos de reproducción. Rheinberger (1997a) comienza el capítulo de su libro diciendo que, si la experimentación tiene «vida propia», usando la famosa frase de Hacking (1983), los SE no por eso viven solos y en general vienen en múltiples variantes que habitan áreas solapantes de investigación, y el desarrollo de éstas podrá conducir a coyunturas. No deben ser equiparadas a los cambios de paradigma ni a las anomalías, como tampoco con «descubrimientos» o «serendipias», porque son más bien eventos sin precedentes que podrán conducir a reorganizaciones mayores y recombinaciones entre ciertos espacios parciales de representación de un SE; son puntos no previstos que resultan de las direcciones abiertas del proceso de experimentación científica.

La aparición imprevista del pequeño ARNm<sup>8</sup> (RNA mensajero), en el SE de síntesis de proteínas libre de células<sup>9</sup> como un componente del metabolismo de la síntesis, produjo un drástico cambio (coyuntura) de un intermediario del metabolismo hacia un actor de transferencia para decodificar la información genética del ácido desoxirribonucleico (ADN) al ácido ribonucleico (ARN) (Rheinberger, 1997a). Tal cambio de carácter, desde un evento bioquímico (metabolismo) hacia uno de

<sup>7</sup> Rheinberger, aunque no explica este término lo usa para dar cuenta de períodos largos de tiempo, en los cuales se puede reconocer la existencia de sistemas experimentales consistentes y coherentes con unas condiciones experimentales o técnicas particulares, en donde objetos epistémicos específicos llegan a ser realidad. Para su estudio de caso, el SE que usaron los bioquímicos para sintetizar proteínas en un tubo de ensayo, consistía en extractos celulares con todas las enzimas mantenidas en funcionamiento. La información biológica contenida en ARNm – ácidos ribonucleicos mensajeros- se adicionaban junto con los ribosomas, y cuando se ponían a trabajar a 37 °C, el SE producía nuevas proteínas que provenían de las instrucciones de los mensajeros. Los objetos epistémicos o científicos de este SE serían los ARNm, ribosomas y sobre todo las proteínas sintetizadas *in vitro*. Son cosas u objetos epistémico-científicos porque en la vida cotidiana uno no se los encuentra sin que existan esos SE con sus condiciones técnicas rigurosamente controladas, que los científicos por su entrenamiento y formación son capaces de manipular adecuadamente.

<sup>8</sup> El ARN es el ácido ribonucleico que química y funcionalmente es distinto del ADN (ácido desoxirribonucleico), que es esencial, en general, mediante una serie de complejas interacciones y clases de RNAs (ARNm, mensajero: ARNr, ribosomal y ARNt de transferencia, por nombrar los más tradicionales), para hacer que el genoma hecho de ADN se realice o cumpla sus funciones en fenotipo, pero todo en interacción con el medio ambiente.

<sup>9</sup> Extractos provenientes de células que han sido trituradas mecánicamente hasta sus más pequeños componentes, y por lo tanto no se encuentran organelos, membranas ni otros elementos que se consideren propiamente como «células». En tales extractos libres de células estaban las proteínas estructurales y funcionales (enzimas), que son necesarias para reducir experimentalmente algunas funciones vitales a un tubo de ensayo.



tipo informativo (molecular), fue para Rheinberger crucial para el origen de la biología molecular como disciplina diferenciada de la bioquímica. Tales hechos no pueden tener prescripción lógica ni mucho menos algorítmica; su producción depende de la estructura abierta del proceso de investigación. Recapitulando, entonces, el pequeño mRNA es para Rheinberger la cosa epistémica u objeto científico (que sería el teorema reificado para Bachelard) que emergió de un SE específico (biosíntesis de proteínas en extractos libres de células) en donde había unas condiciones experimentales o técnicas muy rigurosamente controladas<sup>10</sup>.

Una parte decisiva para Rheinberger (1997a) es cómo entender que un SE repitiendo durante años los mismos ensayos, con todas las condiciones técnicas controladas y las variables rigurosamente ajustadas, pueda ser el escenario para que ocurra una coyuntura o emergencia de la cosa epistémica. Acá, Rheinberger recurre al concepto derridariano de repetición, diferencia y «traza» (que no implica necesariamente huellas o rastros, como algunos trabajos lo muestran<sup>11</sup>), que explica muy finamente en el capítulo *Reproduction and Difference* de su libro. Los SE una vez generados van adquiriendo gradualmente contornos, creando resonancias entre diferentes representaciones<sup>12</sup>, y transmiten significados manejables de señales estabilizadas, pudiendo crear al mismo tiempo un espacio para la emergencia de cosas antes no previstas. Ello implica que los SE una vez estabilizados tienen que desestabilizarse, estar abiertos a generar eventos sin precedentes al incorporar nuevas técnicas, instrumentos, compuestos modelo y dispositivos semióticos. Pero al mismo tiempo, los SE deben ser suficientemente cerrados para prevenir la ruptura de su coherencia reproductiva (Rheinberger, 1997a).

<sup>10</sup> Ampliamente detalladas en los capítulos 4 (*Establishing an In Vitro System of Protein Synthesis, 1949-52*), 6 (*Defining Fractions*), 8 (*The Activation of Aminoacids, 1954-56*), y 10 (*Toward Molecular Biology: The Emergence of Soluble RNA, 1955-58*).

<sup>11</sup> Es curioso como muchos textos y artículos filosóficos que citan el trabajo de Rheinberger, pasan por alto las detalladas descripciones historiográficas de sus capítulos (4, 6 y 10) netamente enfocados en la práctica científica. Aunque usan el *Toward a History of Epistemic Things* para proponer un giro práctico en la filosofía de la ciencia, tales trabajos resultan vacíos de la experimentación propiamente dicha, a pesar de replicar el llamado a prestar atención a la ciencia como la hacen los científicos. No sucede tal situación con los estudios CTS que han dedicado años a estudiar la práctica científica en laboratorios de física contemporánea y biología molecular, como los de Knorr Cetina (2009) y Hackett (2005).

<sup>12</sup> Rheinberger lo explica con más detalle en el capítulo 7 *Spaces of Representation* de su libro. Aunque reconoce la tradición del empirismo y racionalismo, no elegirá esas posturas dicotómicas y se refiere a la función de la representación en el nivel de la práctica científica misma, y cómo proviene de las materialidades del laboratorio. Además, desde un principio, como él no está comprometido con las disyuntivas teoría-realidad y objeto-sujeto, resultará obvio que él buscará una forma alterna para tal fenómeno y es cuando recurre a los grafemas y las inscripciones derridarianas, donde los espacios de representación son coordinados de significación para los objetos epistémicos.

Una segunda manera en que los SE cambian, son los eventos derivados entre los bordes fractales o contornos en flecos de otros SE, y tales interfaces se pueden crear entre dos o más SE para generar híbridos. La hibridación entre el SE que tenía François Jacob (conjugación de bacterias y replicación de fagos) y el de Jacques Monod (síntesis inducida de enzimas), resultó en la emergencia del mRNA, lo cual generó nuevos arreglos de experimentación con cualidades totalmente diferentes (Rheinberger, 1997a).

La tercera forma de cambio de los SE es la bifurcación que sucede cuando el sistema ancestral deja dos linajes de SE descendientes, que tienden a formar ensamblajes que constituyen el espacio experimental, no de un simple y localizado grupo de científicos, sino que está circunscrito a una comunidad científica. La bifurcación ocurre cuando el SE ha adquirido una cierta complejidad, la que permite a los investigadores rastrear huellas epistémicas un poco divergentes. Lo más normal es que tales SE, descendientes o bifurcados, permanezcan ligados por un tiempo, mientras comparten algunos de sus constituyentes materiales (Rheinberger, 1997a). Un caso ilustrativo para la bifurcación de SE sería la derivación de la mecánica cuántica de la física más tradicional del siglo XIX, ya que actualmente existen como disciplinas que se usan para fines específicos en sus interpretaciones. La mecánica newtoniana se usa todos los días en construcciones de los ingenieros, y las interpretaciones cuánticas son usadas rutinariamente en el colisionador de hadrones.

## Sistemas experimentales e imagenología de células vivas

Se pueden ver funcionando las tres vías en que los SE maduran en la consolidación de la biología celular como disciplina en el siglo XIX, porque se concentró en las técnicas de preservación, fijación y tinción de especímenes (Baker, 1952). En ese entonces el área de investigación era conocida como citología, y se hizo posible gracias a la articulación de procedimientos químico-físicos aplicados a los mundos inanimado y animado, creados por científicos altamente calificados como Erlich, Kölliker, Ranvier, Cajal, Golgi y Virchow (Mazzarello, 1999).

La BCC surgió de la hibridación (Bechtel, 2006) de dos SE, primero el de los citólogos que trabajaban con microscopía electrónica de transmisión; y, en segundo lugar, la de los bioquímicos que investigaban *in vitro* reacciones enzimáticas por medio de

ultracentrífugas. La convergencia o hibridación de ambos SE hizo surgir el objeto científico (célula) en su complejidad, ya que los citólogos no tenían la perspectiva funcional y los bioquímicos en su enfoque funcionalista desconocían la estructura celular.

Hay que considerar también cómo los SE ayudan a entender el origen y desarrollo de un SE ICV en la BCC, que ha sido realmente impactante en las dos últimas décadas. Brevemente: el desarrollo de la fotografía, microcinematografía, microscopía de fluorescencia, el cultivo de células y tejidos en los siglos XIX y XX, hicieron posible poder observar moléculas en células y organismos vivientes de manera continua y por largos períodos de tiempo (Coutu & Schroeder, 2013).

Finalizando el siglo XIX, se dieron los primeros registros de imagenología de lo viviente hechos por los embriólogos Charles Whitman, Edmund Wilson y E. G. Conklin, quienes observaron cómo sucedía el desarrollo temprano de un huevo fertilizado que se convertía en un organismo complejo (Stent & Weisblat, 1985; Stern & Fraser, 2001). En la misma época, pocos años antes de la invención de la cinematografía por los hermanos Lumière, el investigador francés Etienne-Jules Marey usó su pistola cronofotográfica para estudiar la fisiología y los movimientos de los animales. Él fundó el Instituto Marey para fabricar y estandarizar instrumentos, en un intento por hacer de la fisiología una ciencia exacta (Landecker, 2006).

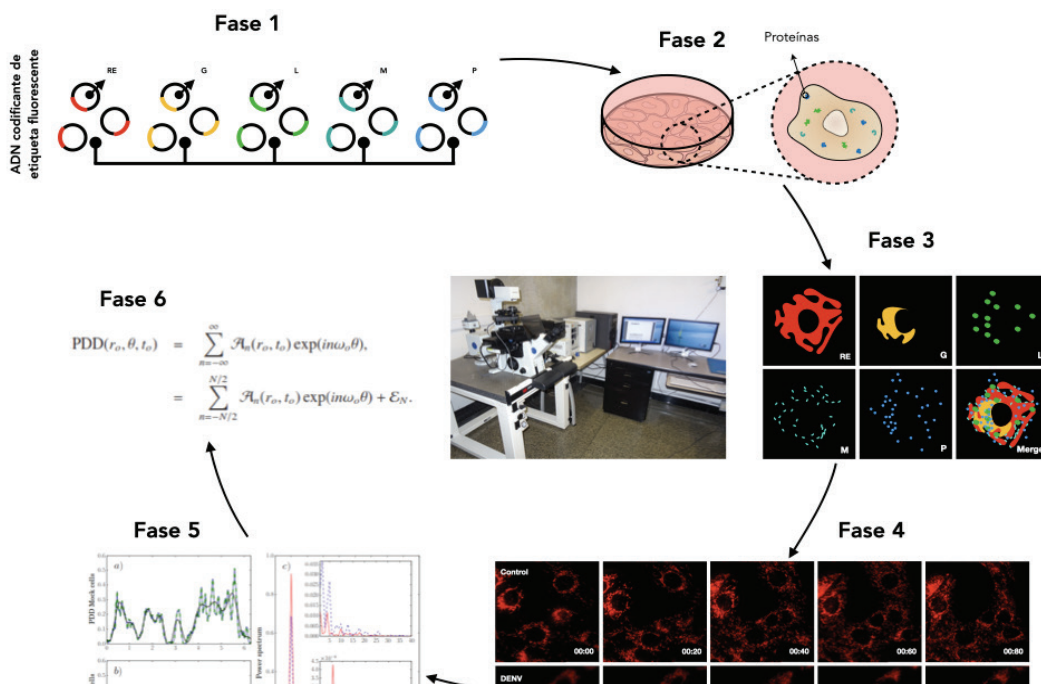
La emergencia de la ICV, a finales del siglo XX, fue en sus orígenes una animación de una teoría de la vida dominada por genes, aunque enfocándose en la «vida de las proteínas», y la práctica realmente salió de tal dominación promoviendo la llegada de otras disciplinas como la biología de sistemas (Landecker, 2012).

Ahora se muestra cómo se hace una película con la metodología de ICV. Para hacer una película ICV, una sonda fluorescente es insertada dentro de una célula viviente (más detalles podrán verse en la Figura 1) o un cuerpo -usualmente usando ingeniería genética para insertar<sup>13</sup> una secuencia de ADN que codifica para la proteína fluorescente-, de tal manera que el cuerpo o la célula misma producen la sonda visible en microscopía de fluorescencia junto con sus propias proteínas. Luego, se obtienen imágenes digitales que resultan de observar los

<sup>13</sup> «Si las cosas epistémicas no despliegan intrínsecamente marcas registrables que las transforman en máquinas, que llegan a ser ellas mismas productivas, trazadores son introducidos dentro de ellas: marcadores radiactivos, tinciones fluorescentes, pigmentos y cualquier cosa que haga inscripciones» (Rheinberger, 1997, p. 110-111).

especímenes a través de microscopios altamente especializados con detectores de luz que registran el movimiento de las moléculas en el tiempo a través de las células o los cuerpos (Landecker, 2012), y la imagen de la célula producida, con tal tecnología, es un cuerpo celular que se ha hecho visible en sus constituyentes moleculares gracias a la fluorescencia insertada mediante ingeniería genética (Hernández-Cuellar et al., 2020).

**Figura 1.** ¿Cómo se hace una película en imagenología de células vivas?<sup>14</sup>



**Fuente:** modificación a partir de Hernández-Cuellar et al. (2020).

El proceso empieza en la fase 1, en donde están los plásmidos (vehículos que transportan fragmentos de ADN o genes). Estos contienen los genes en las distintas versiones (colores) que codifican para proteínas fluorescentes localizadas en distintos compartimentos celulares (retículo endoplasmático, RE; aparato de

<sup>14</sup> La imagen de la fase 4 sólo es uno de todos los fotogramas capturado de los videos que se podrán ver en los siguientes enlaces: video 1 células sin infectar: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rccquifa/article/view/87026/75271> y video 2 células infectadas con dengue: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rccquifa/article/view/87026/75273>

Golgi, G; lisosoma, L; mitocondria, M; peroxisoma, P), y provienen de medusas, corales y otros organismos que habitan las profundidades marinas donde no hay luz, así que usan las radiaciones no visibles de espectro y de mayor energía (U.V.: ultravioleta) que para hacerlas visibles se les interponen unos filtros U.V. en el paso de la luz del microscopio. La fase 2 es la introducción de los genes en las células en cultivo para lo cual se usan varios métodos que provienen de los SE de la virología o también de la BM. Luego de transcurrido un día los genes foráneos introducidos en las células son expresados en sus respectivas proteínas, que al ser fluorescentes resultan visibles con el microscopio para tales efectos (Fase 3). En esta fase 3 se esquematiza además que la expresión de proteínas es diferencial de acuerdo con los distintos compartimentos celulares, en vista que tales proteínas tienen secuencias de localización que las dirigen a tales sitios de la célula. En la fase 4 la expresión real de las proteínas dentro de las células, en este caso correspondientes a mitocondrias (Cardona-Gómez et al., 2016), es distinta en células infectadas vs células que no están infectadas con virus dengue (DENV). En la fase 5 aparecen los registros de la distribución de pixels obtenidos a partir de las imágenes de los fotogramas del video, con los cuales se hace una gráfica que ilustra el comportamiento del fenómeno. Finalmente, en la fase 6 está el modelamiento matemático que describe la distribución dinámica de las mitocondrias en células no infectadas con respecto a las que están infectadas con dengue. El virus no está marcado en ningún color, sólo podremos obtener información de la distribución de mitocondrias.

La ICV ha llegado a ser una herramienta constitutiva y de rutina en la investigación biomédica y en ciencias de la vida (Papkovsky, 2010). ¿Cómo ha sucedido todo este cambio tan importante? Para responder a esa pregunta usaremos algunos de los trabajos de Landecker (2011), quien manifiesta que «si pudiéramos hablar del modernismo biológico, éste sería sobre la materialidad y la fijación del tiempo en relación con la materia biológica» (p. 382). En otras palabras, sin la microcinematografía los cambios en el mundo celular serían tan lentos que no los podríamos detectar como observadores. Para Landecker, el origen de ICV es una lucha entre dos corrientes (que bajo nuestra perspectiva tiene distintos SE) para interpretar la realidad biológica. Una tradición proveniente de la anatomía estudiando cadáveres que privilegiaba la estructura, de cuya herencia provino la histología, y luego la citología. Mientras había otra tradición que privilegiaba la función (fisiología) o el sistema viviente y usaba las vivisecciones (Schiller, 1967).

Las preparaciones fijadas teñidas ofrecían mucho más detalle visual del que podría obtenerse con especímenes húmedos y vivos, y además podrían ser guardados por meses y ser examinado repetidamente (Landecker, 2009). Esta tradición de anatomistas, histólogos y citólogos fue hegemónica por más de un siglo de investigación biomédica, lo que dificultó la llegada de los métodos más fisiológicos, funcionales y dinámicos. De ahí que Landecker (2011) sostenga que las máquinas de microcinematografía y las películas en lapsos de tiempo (*time-lapse*) generaron una forma muy específica de producción de un «mundo microscópico», que lo transformaron desde una dimensión espacial a otra temporal; y, mucho más recientemente, ella afirma<sup>15</sup>:

La imagenología de células vivas como la conocemos hoy en día realmente no pudo iniciar hasta la invención de la GFP (*Green Fluorescent Protein*) y la microscopía confocal. Antes eran las imágenes radioisotópicas que se obtenían en experimentos de pulso y caza, pero constituían imágenes fijas de un proceso dinámico. La videomicroscopía fue lo que llenó el espacio histórico entre el trabajo de las películas (microcinematografía) y las computadoras como método basado en el tiempo, pero era mucho más «fisiológico» en el sentido que estaba siguiendo cosas que las cámaras podían «ver». El desarrollo de la capacidad informática para manejar los datos visuales también fue una contribución importante (Landecker, comunicación personal, 14 de agosto de 2020).

## Imagenología de células vivas: hibridación de sistemas experimentales

A continuación, se aplicarán los SE de Rheinberger para dar cuenta de cómo el desarrollo de la ICV no fue guiado por teorías exclusivamente, tampoco puede ser un cambio científico explicable de manera racionalista ni algorítmica. Es importante aclarar en este punto, que la postura de esta investigación sobre la ICV y las células no está asumiendo la dicotomía objeto-concepto, sino que se adhiere al teorema reificado de Bachelard o el objeto epistémico-científico de Rheinberger.

<sup>15</sup> Texto original: «Live cell imaging as we know it today really did not get underway until the invention of GFP and confocal microscopy - Before then, imaging with radiation was done usually by stills - pulse-chase experiments and so on. Video microscopy was what filled the historical space in-between film-based work and the computer as the time-based medium, but it was much more 'physiological' in the sense that it was following the things that the cameras could 'see'. The development of the computing capacity to deal with the visual data was also important».

Así que no se está proponiendo una coevolución entre el concepto célula, su representación y su referente «real». Serán evidentes en este aparte los aspectos sociales, culturales, institucionales y hasta económicos en el desarrollo del SE de la más novedosa biología celular. Hay que recordar que en la definición de SE que hace Rheinberger incluye esos aspectos más allá del mero arreglo experimental del laboratorio, así que la postura aquí plasmada podría ser compatible con estudios sociológicos clásicos como el del fago lambda y el origen de la biología molecular<sup>16</sup>, donde el flujo de conceptos e ideas en consonancia con cambios en la economía social daban cuenta del desarrollo científico (Mullins, 1972).

Dos tradiciones de investigación biológica y médica, que pretendían entender el proceso de la vida y la enfermedad finalizando el siglo XIX, estaban suficientemente maduras con sus prácticas científicas especificadas en SE diferenciados. Una era la tradición estructuralista, con varios siglos de historia, que en el caso de la citología trabajaba con «necropsias celulares», donde lo importante era el *locus* estructural del problema. Esta tradición morfológica, de varios siglos, alcanzó un refinamiento extremo con la microscopía electrónica de transmisión y la difracción de rayos X. La otra es la tradición fisiológica o funcional, con menos siglos de antigüedad, que se ocupaba de la vida y la enfermedad desde el *locus* funcional o una perspectiva dinámica.

Las dos tradiciones, con SE muy distintos y representados en la citología y la bioquímica, lograron una hibridación en los años sesenta para dar origen a la BCC (Bechtel, 2006). Entonces, el objeto epistémico de la citología era la célula como estructura, como espécimen, un fotograma congelado de una realidad viviente obtenido por microscopía electrónica. En cambio, para la bioquímica, el objeto epistémico eran funciones celulares (estudios enzimológicos) aisladas mediante ultracentrifugación. Con la hibridación de los SE de ambas disciplinas se originó la BCC, como expone Bechtel (2006), quedando integrados el *locus* estructural con el funcional y ya la célula dejó de ser esa *Terra Incognita*. Se tuvo entonces, un nuevo objeto epistémico: la célula como unidad funcional y estructural. Ahora bien, aunque desde los años 30 del siglo XIX la teoría celular postuló tal caracterización (Mazzarello, 1999), lo que se muestra en esta investigación es que realmente en esos SE previos no había sucedido tal integración.

<sup>16</sup> Entre los biólogos moleculares de los años noventa e inicios del nuevo milenio, existían dos textos que constituían algo así como el credo histórico de la comunidad científica. Uno era el libro de Cairns et al. (2007) casi con el mismo título del artículo que apareció después y que citamos arriba (Mullins, 1972). El otro era el libro de Schrödinger (2012) *What is Life?* publicado originalmente en 1949.

Las investigaciones con SE dinámicos y más afines a la tradición fisiológica continuaron estudiando el proceso viviente, y para dar cuenta de tal fenómeno se terminó consolidando la ICV como una hibridación SE foránea particular<sup>17</sup>, incluyendo dispositivos, instrumentos, prácticas y metodologías que se requerían para sus trabajos provenientes de la microcinematografía, microscopía de fluorescencia y microscopía confocal. De estos tres últimos SE (microcinematografía, microscopía de fluorescencia y microscopía confocal) es que aparecerá la ICV mediante el proceso de hibridación, sin olvidar que a su vez esos SE provenían de otras hibridaciones previas.

La microcinematografía proviene de la hibridación de la cinematografía inventada por los hermanos Lumière, con los desarrollos de cultivos de tejidos y células<sup>18</sup>, como fue registrado históricamente por el patólogo Ronald Canti en 1928 (Landecker, 2011). Así, varios campos se hibridan para dar origen a la microscopía de fluorescencia: la bioluminiscencia<sup>19</sup>, la fluorescencia natural de la medusa marina *Aequorea victoria* (Davenport & Nicol, 1955), la bioquímica de la proteína verde fluorescente –GFP, por sus siglas en inglés (Shimomura et al., 1962)–, además del desarrollo de múltiples mutantes de la GFP que ofrecieron toda una paleta de colores (Haseloff, 1998) juntamente con el desarrollo de los microscopios para detectar tal fenómeno (Renz, 2013).

La microscopía láser confocal fue la última contribución para la ICV, que como en otras también resultó por hibridación de otros SE: «El invento tuvo una acogida tan rápida en la década de 1980 porque mejoraba la obtención de imágenes en un instrumento muy conocido y utilizado: el microscopio de fluorescencia» (Amos & White, 2003, p. 335), lo cual permitió el seccionamiento óptico de especímenes celulares. Ulteriores avances empezando el nuevo milenio en sistemas de incubación de células vivas, dispositivos de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés) en las cámaras de registro, y mejores sondas fluorescentes que evitaban el dispendioso trabajo del clonamiento molecular, así como otras contribuciones, condujeron a la ICV (Hernández-Cuellar et al., 2020).

<sup>17</sup> Es importante aclarar que no se trata de una programación teleológica, no es que los investigadores y las comunidades epistémicas busquen hibridar sus respectivos SE. Más bien es que la dinámica propia de los SE y su circuito material-discursivo, los lleva a cooperar y compartir espacios de representación de los cuales habrán de emerger los nuevos objetos epistémicos.

<sup>18</sup> El médico y filósofo francés, Alexis Carrel, tuvo un rol protagónico en estos desarrollos (Landecker, 2011), aunque no serán considerados en este trabajo.

<sup>19</sup> Descubierta por Raphaël Dubois entre 1885 y 1888, como lo reconoce el Nóbel Shimomura en 1962.



En síntesis, a partir de tres SE distintos (microcinematografía, microscopía de fluorescencia y microscopía confocal) hubo una hibridación para dar origen a la ICV, ofreciendo la posibilidad de integrar aquellas dos tradiciones separadas por siglos (estructuralistas y funcionalistas) en el entendimiento de la célula viviente.

## Comentarios finales y perspectivas

Esta investigación arroja luces sobre un cambio que ha alterado la práctica y percepción de lo estático hacia lo dinámico íntimamente relacionado con los SE, que como lo percibió Tsien (2003)<sup>20</sup>, haciendo eco del espíritu de las críticas que los microcinematógrafos hicieron a los histólogos hace un siglo, dijo: «a las secuencias del genoma les falta la información espacial y temporal y por lo tanto son tan útiles, como un censo o una guía telefónica»<sup>21</sup> (p. SS16).

Se ha mostrado en el desarrollo de esta investigación cómo la reconceptualización de la FT bachelardiana de Rheinberger con sus SE, ha sido de gran utilidad para exponer que, desde el inicio de los estudios celulares, hace varios siglos, hasta llegar el siglo pasado y el nuevo milenio, el origen y desarrollo de la biología celular no puede ser abordado desde posturas filosóficas tradicionales dominadas por teorías. En el proceso de emergencia de objetos científicos, en la maduración, hibridación y diversificación de SE, es que se tendrán que buscar las narrativas explicativas del cambio científico en biología celular. Se espera que, a partir de este trabajo, otros investigadores «híbridos» (filósofos con mentalidad de científicos, y científicos con mentalidad de filósofos) se animen a usar la metodología rheinbergeriana-bachelardiana en sus áreas de trabajo, para mostrar las bondades y las dificultades que se requieren superar en este giro práctico de la ciencia.

De otra parte, se acude al llamado de Landecker (2011) de recuperar el término «fenomenología celular», que es popular en el medio científico para describir y clasificar fenómenos en contraposición con el estudio de mecanismos. Específicamente, Scott et al. (2010) afirman que «el uso de tales relaciones empíricas,

<sup>20</sup> Compartió el Nobel de Química en 2008 con Chalfie y Shimomura por los descubrimientos de la proteína verde fluorescente.

<sup>21</sup> Importante poner en contexto que en el nuevo milenio, y finalizando el siglo anterior, la investigación biomédica ha sido centrada en los genes, y que los más respetables científicos de la biología molecular hacían afirmaciones peyorativas sobre SE como la imagenología celular. Por lo que Tsien (2003) está rescatando un sentimiento de malestar entre dos estilos de pensamiento e investigación que en la vida cotidiana de las comunidades científicas se percibe.

análogas a las leyes fenomenológicas, pueden facilitar nuestro entendimiento de la manipulación de sistemas biológicos complejos» (p. 1099).

En el trabajo historiográfico que hizo Bechtel (2006) sobre la BCC, usó la búsqueda de mecanismos como supuesto ontológico para guiar sus investigaciones, pero de acuerdo con lo que se ha mostrado, no son los investigadores los que van buscando los mecanismos, sino que son los SE que incluyen obviamente a los investigadores, procesos complejos y ensamblados que, en su devenir histórico, van generando objetos epistémicos mediante las coyunturas, hibridaciones y bifurcaciones de SE. Así, una perspectiva que surge de esta reinterpretación del trabajo de Bechtel, bajo la mira de los SE de Rheinberger, sería que los SE en su concepción más amplia estarían subyacentes a los procesos de individuación que usan los científicos para definir las entidades ontológicas con que trabajan.

La idea central defendida en este trabajo es que el SE de ICV provino de hibridación de otros SE, permitiendo la visualización del microcosmos celular en su estructura y función, la *Terra Incógnita*, de Duvé (Bechtel, 2006), porque se logró una comprensión hasta el momento inalcanzable: la célula viviente como un constructo u objeto epistémico-científico (un grafema articulador de significados), que fue cogenerado igualmente en un espacio de representación inexistente previamente. Ello implicó, desde la perspectiva CTS, que el SE no sólo fuera un arreglo científico en un laboratorio, sino la convergencia de aspectos locales, técnicos, instrumentales, institucionales, sociales y epistémicos como lo ha desarrollado Rheinberger (1997a).

Por lo tanto, en este dominio CTS se muestra que se puede ir más allá con esta perspectiva iluminadora (aunque no exenta de ciertas limitaciones hermenéuticas) que supera las posturas tradicionales internalistas que pretendían hacer encajar la realidad a las teorías. Además, tales argumentaciones internalistas suelen ser teleológicas (conducentes a un fin), en el sentido que establecen una progresión sobre cómo los investigadores persiguiendo propósitos u objetos, prueban hipótesis mediante experimentos (adecuación) para llegar a la consolidación de teorías científicas.

Aunque el contexto de descubrimiento fue considerado como irrelevante en la filosofía de la ciencia más tradicional (Steinle, 2002), este estudio de caso de la ICV ha mostrado que la heterogeneidad de los SE y el proceso de maduración que experimentan para engendrar otros sistemas mediante bifurcaciones, hibridaciones

y coyunturas, terminan configurando una diversidad de posibilidades que podrían dar algunos rendimientos teóricos importantes en estudios CTS específicamente en las posibilidades de la FT.

Concebida la FT más allá de lo epistémico como lo desarrolló Rheinberger, la investigación entra en una filosofía, sociología y antropología de la experimentación, específicamente en el contexto del descubrimiento como terreno fértil respecto al muy agotado y tradicional contexto de justificación. Sin embargo, la propuesta acá es distanciarse realmente de la dicotomía teoría-experimento, ya que, aunque Steinle (2006) y otros académicos apuestan por resituar el contexto del descubrimiento, continúan preguntándose cómo situaciones epistémicas, actividad experimental y aspectos socioculturales se unen y moldean para originar conceptos, o como la experimentación científica «produce conceptos».

Postular que los objetos epistémico-científicos son co-construidos con el espacio de representación, todo dentro de un SE en su más amplia concepción, no es una apuesta de relativismo social como el tradicional cuestionamiento que se ha hecho a los estudios CTS. En tal sentido, una apuesta interesante podría ser el programa del relativismo empírico de Harry Collins, que hace referencia al escenario de múltiples interpretaciones de base empírica que iluminan la indagación del relativismo en una «concepción experimental de la realidad». La «explicación de las realidades» no encaja en una teoría ya existente, porque hay una cogeneración de objeto epistémico-científico y espacio de representación en los SE; además, abre posibles discusiones e incluso confrontación de imaginarios en el seno de las prácticas científicas (como algunos estudios de representación científica).

El proceso de maduración de SE (bifurcación, hibridación y coyuntura) podría dar cuenta de cómo sucede la integración entre tradiciones científicas, como hemos visto el caso para la microcinematografía, microscopía de fluorescencia y microscopía confocal. No obstante, también podrían explicar otros fenómenos de disciplinas, que resultaron en el proceso de maduración de SE irreductiblemente separadas mediante la bifurcación de SE. Un ejemplo ilustrativo de tal proceso sucedió en la investigación en plasticidad celular cuyo descubrimiento original fue en 1712, pero resultó en una trayectoria totalmente divergente de la corriente principal de la investigación en diferenciación celular durante varios decenios (Kraft & Rubin, 2016).

Otro rendimiento teórico que se extrae del presente trabajo surge en consonancia con la tan agraciada concepción latouriana de los «móviles inmutables» (Latour, 2011). Los dispositivos de inscripción producen estos constructos, que son eminentemente transportables pero que no cambian, haciendo alusión a toda la heterogeneidad de representaciones con que trabajan los científicos y no con los «objetos naturales». Una ecuación, una figura, una imagen o una tabla, por ejemplo, pueden viajar entre muchos laboratorios sin sufrir cambio alguno.

Para el caso de la ICV, se debe desarrollar una noción distinta de tales «móviles inmutables», porque las células vivas, con sus orgánulos subcelulares fluorescentes, son el objeto mismo de trabajo, aunque intervenido, manipulado y penetrado, como dirían Latour y Woolgar (1986)<sup>22</sup>. En la ICV ocurre un fenómeno particular por su trayectoria histórica relacionado con la preservación, fijación y tinción de especímenes anatómicos e histológicos, que como dice Rheinberger (2007), las preparaciones o especímenes son representaciones sí mismas, no hay una representación aparte del objeto representado: piezas anatómicas y placas histológicas de museos conservadas hace decenios, o plantas preservadas en herbarios.

En consecuencia, como ya se adelantó, las células vivas con organelos fluorescentes del nuevo SE, no son especímenes bien preservados ni la representación de éstos constituyen los objetos epistémico-científicos de la más nueva biología celular. En el sentido latouriano, los vídeos provenientes de la ICV serían otro tipo de móviles inmutables claramente, cumplen su función esencial en las comunidades científicas con las cuales trabajan los investigadores. Pero a tal término podríamos agregarle el epíteto «dinámicos», así que la ICV, como un nuevo SE que emergió a partir del año 2000, genera los «móviles inmutables dinámicos».

Los móviles mutables no son importantes por lo que representan, sino por la forma cómo trabajan: fijan eventos transitorios, haciéndolos más durables, permitiéndoles moverse en el espacio y el tiempo (haciéndolos disponibles en muchos lugares) (Rheinberger, 1997a).

<sup>22</sup> Literalmente ellos afirman: «No basta con representar el objeto; éste debe ser penetrado y expuesto por una manipulación activa de su organización» (p. 26), lo cual es la mejor manera de explicar la obtención de una línea celular recombinante y fluorescente en sus orgánulos subcelular.

Lo que es significativo de la representación en cuanto inscripción es que las cosas pueden ser re-presentadas fuera de su contexto original y local, e insertadas en otros contextos, siendo la representación que interesa. Las inscripciones no son de tal manera meras abstracciones, son purificaciones durables y móviles, las que a su vez son capaces de retroactuar en otras articulaciones grafemáticas, siendo lo más importante que no sólo lo logran en aquellos contextos donde fueron originadas.

Rheinberger (1997a) afirma que, dentro de un SE, un espacio de representación es establecido al engendrar cosas que de otra forma no habrían podido ser atrapados como objetos de acción epistémica; por ejemplo, algunas representaciones bioquímicas específicas generan un espacio extracelular de reacciones que se asume suceden dentro de las células. Pero al mismo tiempo se pregunta: ¿qué sucede dentro de las células?, postulando que sólo puede saberse mediante el uso de modelos, por lo que considera que la naturaleza llega a ser real - en un sentido técnico y científico - como modelo.

Por eso, muy al contrario de la tradición científica, Rheinberger (1997a) considera que la naturaleza no es un referente para un experimento, más bien es un riesgo y una amenaza constante su intrusión. En sus palabras «uno no debe contaminar un experimento *in vitro* con naturaleza» (p. 109).

Importante comentar que existen procesos sociales clave que son parte integral de la co-construcción de herramientas, trabajos y lo correcto de la investigación, que incluyen la construcción de problemas factibles. Debe enfatizarse que estos procesos están muy superpuestos e integrados entre sí, aunque pueden separarse analíticamente, no ocurren de manera discreta en la práctica. Tales procesos están incrustados en la práctica, en las ideas, las instituciones y en el tejido social, en la concepción «ciencia como práctica», pero no en la concepción tradicional de cambios científicos como conceptos sostenidos a través del tiempo («ciencia como conocimiento») (Clarke & Fujimura, 2014).

El SE posibilita, pero también limita el desarrollo de la investigación científica, pues en el corazón de la construcción de problemas factibles está la manipulación y articulación activa de varios factores implicados en la investigación. Por eso se necesita conocer cuáles oportunidades y recursos están involucrados en la construcción de empresas de investigación, como las grandes dificultades y complejidades que enfrentaron los investigadores para obtener y mantener materiales en investigaciones fisiológicas del siglo pasado. Los materiales

disponibles —organismos vivos y especímenes frescos— a menudo configuraban o determinaban qué trabajo se podía y qué no se podía hacer. Esas condiciones previas del SE no sólo alteraron el ritmo y trayectoria investigativa, sino que los mismos problemas se delimitaron por los materiales disponibles, no por tecnologías o teorías (Clarke & Fujimura, 2014).

Otra derivación teórica interesante de esta investigación está relacionada con los procesos de individuación desde la perspectiva de la metafísica científica, un campo floreciente y de intensa investigación (Bueno et al., 2018; Guay & Pradeu, 2016; Love, 2018) que podría articularse muy bien al enfoque de los SE porque individuar es para tal escuela lo que para Rheinberger sería la emergencia de un objeto epistémico. Si se lograra articular procesos de individuación como parte del devenir histórico que sucede en los SE, habría una nueva mirada del giro práctico de la ciencia y las explicaciones CTS tendrían un insumo adicional de tipo metafísico para enriquecer sus discusiones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Camilo Eduardo Hernández-Cuellar por el diseño gráfico de las imágenes, y al servicio <https://www.betranslated.com/> por la traducción al francés de este trabajo. Además, al proyecto Sostenibilidad-CODI-2018-9 y de Dedicación Exclusiva 2020-2021 de la Universidad de Antioquia para el Grupo de Medicina Molecular y de Translación, y al proyecto MinCiencias código 111584466951 (2020-2022).

## REFERENCIAS

- Ackermann, R. (1989). The new experimentalism. *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 40, n. 2, 185-190. <https://www.jstor.org/stable/687509>
- Ackermann, R. J. (2016). *Data, Instruments, and Theory: A dialectical approach to understanding science*. Princeton University Press.
- Albarracín Teulón, A. (1983). *La teoría celular: historia de un paradigma*. Alianza Editorial.

- Amos, W. B.; White, J. G. (2003). How the Confocal Laser Scanning Microscope entered Biological Research. *Biology of the Cell*, v. 95, n. 6, 335-342. [https://doi.org/10.1016/s0248-4900\(03\)00078-9](https://doi.org/10.1016/s0248-4900(03)00078-9)
- Bachelard, G. (2004a). *La formación del espíritu científico. Contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo* (15a. ed.). Siglo XXI editores.
- Bachelard, G. (2004b). Noúmeno y microfísica. En *Estudios*. Amorrortu Editores.
- Baker, J. R. (1952). The Cell-Theory: A Restatement, History, and Critique: Part III. The Cell as a Morphological Unit. *Journal of Cell Science*, v. 93, n. 22, 157-190. <https://doi.org/10.1242/jcs.s3-93.22.157>
- Bechtel, W. (2006). *Discovering cell mechanisms: The creation of modern cell biology*. Cambridge University Press.
- Boon, M. (2015). The Scientific Use of Technological Instruments. En S. O. Hansson (ed.), *The role of technology in science: Philosophical perspectives* (pp. 55-79). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9762-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9762-7_4)
- Brockliss, L. W. B. (1992). The Scientific Revolution in France. En R. Porter; M. Teich (eds.), *The Scientific Revolution in National Context* (pp. 55-89). Cambridge University Press.
- Bruhn, M. (2011). Life lines: An art history of biological research around 1800. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, v. 42, n. 4, 368-380. <https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2011.07.007>
- Buchdahl, G. (1965). A revolution in historiography of science. *History of science*, v. 4, n. 1, 55-69. <https://doi.org/10.1177/007327536500400103>
- Bueno, O.; Chen, R. L.; Fagan, M. B. (eds.). (2018). *Individuation, process, and scientific practices*. Oxford University Press.
- Cairns, J.; Stent, G. S.; Watson, J. D. (eds.). (2007). *Phage and the Origins of Molecular Biology*. Cold Springs Harbor Laboratory Press.
- Cardona-Gomez, J. C.; Ariza-Jimenez, L. F., Gallego-Gomez, J. C. (2016). A Proposal for a Machine Learning Classifier for Viral Infection in Living Cells Based on Mitochondrial Distribution. En S. Najman (ed.), *Cell Biology-New Insights*. <https://doi.org/10.5772/61293>

- Chimisso, C. (2008). From phenomenology to phenomenotechnique: the role of early twentieth-century physics in Gaston Bachelard's philosophy. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, v. 39, n. 3, 384-392. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2008.06.010>
- Clarke, A. E.; Fujimura, J. H. (eds.). (2014). *The Right Tools for the Job. At Work in Twentieth-Century Life Sciences*. Princeton University Press.
- Coopmans, C.; Vertesi, J.; Lynch, M. E.; Woolgar, S. (eds.). (2014). *Representation in Scientific Practice Revisited*. The MIT Press.
- Coutu, D. L.; Schroeder, T. (2013). Probing cellular processes by long-term live imaging – historic problems and current solutions. *Journal of Cell Science*, v. 126, n. 17, 3805-3815. <https://doi.org/10.1242/jcs.118349>
- Daston, L.; Galison, P. (2007). *Objectivity*. Zone Books.
- Davenport, D.; Nicol, J. A. C. (1955). Luminescence in hydromedusae. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 144, n. 916, 399-411. <https://doi.org/10.1098/rspb.1955.0066>
- Deleuze, G. (2002). *Diferencia y repetición*. Amorrortu Editores.
- Derrida, J. (1978). *De la gramatología*. Siglo XXI editores.
- Fleck, L. (1986). *La génesis y el desarrollo de un hecho científico. Introducción a la teoría del estilo de pensamiento y del colectivo de pensamiento*. Alianza Editorial.
- Gómez Mata, M. J. (2013). Fenomenotécnica: Bachelard y el giro práctico en la Filosofía de la Ciencia. *ArtefaCToS. Revista de estudios sobre la ciencia y la tecnología*, v. 6, n. 1, 65-80. <https://revistas.usal.es/index.php/artefactos/article/view/15587>
- Goss, C. M. (1937). The Historical Background of Schwann's Cell Theory. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, v. 10, n. 2, 125-144.
- Guay, A.; Pradeu, T. (eds.). (2016). *Individuals Across the Sciences*. Oxford University Press.
- Hackett, E. J. (2005). Essential Tensions: Identity, Control, and Risk in Research. *Social Studies of Science*, v. 35, n. 5, 787-826. <https://doi.org/10.1177/0306312705056045>
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511814563>



- Harris, H. (2000). *The Birth of the Cell*. Yale University Press.
- Haseloff, J. (1998). GFP variants for multispectral imaging of living cells. *Methods in Cell Biology*, v. 58, 139-151. [https://doi.org/10.1016/S0091-679X\(08\)61953-6](https://doi.org/10.1016/S0091-679X(08)61953-6)
- Hernández-Cuellar, C. E.; Castrillón-Martínez, E.; Gallego-Gómez, J. C. (2020). Descubrimiento de fármacos basado en imagenología de células vivas. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, v. 49, n. 1, 114-136. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v49n1.87026>
- Hodgkin, J. (2001). Hershey and his heaven. *Nature Cell Biology*, v. 3, n. 3. <https://doi.org/10.1038/35060155>
- Jacob, F. (1988). *The Statue Within: An Autobiography*. Basic Books.
- Kittler, F. A. (1992). *Discourse Networks, 1800/1900*. Stanford University Press.
- Knorr Cetina, K. (1999). *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*. Harvard University Press.
- Kraft, A.; Rubin, B. P. (2016). Changing cells: An analysis of the concept of plasticity in the context of cellular differentiation. *BioSocieties*, v. 11, n. 4, 497-525. <https://doi.org/10.1057/s41292-016-0027-y>
- Landecker, H. (2006). Microcinematography and the History of Science and Film. *Isis*, v. 97, n. 1, 121-132. <https://doi.org/10.1086/501105>
- Landecker, H. (2009). Seeing things: from microcinematography to live cell imaging. *Nature methods*, v. 6, n. 10, 707-709. <https://doi.org/10.1038/nmeth1009-707>
- Landecker, H. (2011). Creeping, Drinking, Dying: The Cinematic Portal and the Microscopic World of the Twentieth-Century Cell. *Science in Context*, v. 24, n. 3, 381-416. <https://doi.org/10.1017/S0269889711000160>
- Landecker, H. (2012). The Life of Movement: From Microcinematography to Live-Cell Imaging. *Journal of Visual Culture*, v. 11, n. 3, 378-399. <https://doi.org/10.1177/1470412912455622>
- Latour, B. (2011). Drawing things together. En M. Dodge; R. Kitchin; C. Perkins (eds.), *The map reader: Theories of mapping practice and cartographic representation* (pp. 65-72). <https://doi.org/10.1002/9780470979587>
- Latour, B.; Woolgar, S. (1986). *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt32bbxc>

- Lenoir, T. (2010). Epistemology Historicized. Making Epistemic Things. En H. J. Rheinberger, *An Epistemology of the Concrete: Twentieth-Century Histories of Life* (pp. xi-xx). Duke University Press.
- Love, A. C. (2018). Individuation, Individuality, and Experimental Practice in Developmental Biology. En O. Bueno; R. L. Chen; M. B. Fagan (eds.), *Individuation, Process, and Scientific Practices* (pp. 165-191). <https://doi.org/10.1093/oso/9780190636814.003.0008>
- Lynch, M.; Woolgar, S. (eds.). (1990). *Representation in Scientific Practice*. MIT Press.
- Martínez, S. F.; Huang, X. (2015). *Hacia una filosofía de la ciencia centrada en prácticas*. Instituto de Investigaciones Filosóficas.
- Mazzarello, P. (1999). A unifying concept: the history of cell theory. *Nature Cell Biology*, v. 1, n. 1, E13-E15. <https://doi.org/10.1038/8964>
- Morange, M. (1998). *A History of Molecular Biology*. Harvard University Press.
- Mullins, N. C. (1972). The development of a scientific specialty: The phage group and the origins of molecular biology. *Minerva*, v. 10, n. 1, 51-82. <https://doi.org/10.1007/BF01881390>
- Papkovsky, D. (ed.). (2010). *Live Cell Imaging: Methods and Protocols*. Humana Press.
- Pickering, A. (1995). *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*. University of Chicago Press.
- Renz, M. (2013). Fluorescence microscopy—A historical and technical perspective. *Cytometry Part A*, v. 8, n. 9, 767-779. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.22295>
- Rheinberger, H. J. (1994). Experimental Systems: Historiality, Narration, and Deconstruction. *Science in Context*, v. 7, n. 1, 65-81. <https://doi.org/10.1017/S0269889700001599>
- Rheinberger, H. J. (1995a). From Experimental Systems to Cultures of Experimentation. En G. Wolters; J. G. Lennox (eds.), *Concepts, Theories, and Rationality in the Biological Sciences* (pp. 107-122). University of Pittsburgh Press.
- Rheinberger, H. J. (1995b). From microsomes to ribosomes: “Strategies” of “representation”. *Journal of the History of Biology*, v. 28, n. 1, 49-89. <https://doi.org/10.1007/BF01061246>
- Rheinberger, H. J. (1997a). *Toward a History of Epistemic Things: Synthesizing Proteins in the Test Tube*. Stanford University Press.

- Rheinberger, H. J. (1997b). Experimental Complexity in Biology: Some Epistemological and Historical Remarks. *Philosophy of Science*, v. 64, S245-S254. <https://doi.org/10.1086/392604>
- Rheinberger, H. J. (2005). Gaston Bachelard and the notion of “phenomenotechnique”. *Perspectives on Science*, v. 13, n. 3, 313-328. <https://doi.org/10.1162/106361405774288026>
- Rheinberger, H. (2007). Preparaciones: Representaciones de sí mismas. En E. Suárez Díaz (comp.), *Variedad infinita. Ciencia y representación. Un enfoque histórico y filosófico* (pp. 319-334). Limusa.
- Rheinberger, H. J. (2010). *An Epistemology of the Concrete: Twentieth-Century Histories of Life*. Duke University Press.
- Rheinberger, H. J. (2011). Consistency from the perspective of an experimental systems approach to the sciences and their epistemic objects. *Manuscrito*, v. 34, n. 1, 307-321. <https://doi.org/10.1590/S0100-60452011000100014>
- Schiller, J. (1967). Claude Bernard and vivisection. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, v. 22, n. 3, 246-260.
- Schrödinger, E. (2012). *What is Life?: With Mind and Matter and Autobiographical Sketches*. Cambridge University Press.
- Scott, M.; Gunderson, C. W.; Mateescu, E. M.; Zhang, Z.; Hwa, T. (2010). Interdependence of Cell Growth and Gene Expression: Origins and Consequences. *Science*, v. 330, n. 6007, 1099-1102. <https://doi.org/10.1126/science.1192588>
- Shapin, S.; Schaffer, S. (2005). *El Leviathan y la bomba de vacío: Hobbes, Boyle y la vida experimental*. Universidad Nacional de Quilmes.
- Shimomura, O.; Johnson, F. H.; Saiga, Y. (1962). Extraction, Purification and Properties of Aequorin, a Bioluminescent Protein from the Luminous Hydromedusan, Aequorea. *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, v. 59, n. 3, 223-239. <https://doi.org/10.1002/jcp.1030590302>
- Steinle, F. (2002). Experiments in History and Philosophy of Science. *Perspectives on Science*, v. 10, n. 4, 408-432. <https://doi.org/10.1162/106361402322288048>
- Steinle, F. (2006). Concept formation and the limits of justification: “Discovering” the two electricities. En J. Schickore; F. Steinle (eds.), *Revisiting discovery and justification* (pp. 183-195). Springer. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4251-5\\_11](https://doi.org/10.1007/1-4020-4251-5_11)

- Stent, G. S.; Weisblat, D. A. (1985). Cell Lineage in the Development of Invertebrate Nervous Systems. *Annual Review of Neuroscience*, v. 8, 45-70. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.08.030185.000401>
- Stern, C. D.; Fraser, S. E. (2001). Tracing the lineage of tracing cell lineages. *Nature Cell Biology*, v. 3, n. 9, E216-E218. <https://doi.org/10.1038/ncb0901-e216>
- Torretti, R. (2012). Fenomenotecnia y conceptualización en la epistemología de Gaston Bachelard. *Theoria. Revista de Teoría, Historia y Fundamentos de la Ciencia*, v. 27, n. 1, 97-114.
- Tsien, R. Y. (2003). Imagining imaging's future. *Nature reviews. Molecular cell biology*, SS16-21.
- Weber, M. (2004). *Philosophy of Experimental Biology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511498596>