

Validación de observaciones y de simulaciones astrofísicas: un enfoque epistemológico.

Maximiliano Bozzoli¹ y Dante Paz²

Resumen. El concepto clásico de observación en la astrofísica contemporánea ha sufrido cambios considerables debido, en gran parte, a ciertas observaciones llevadas a cabo a través de simulaciones computacionales. En este trabajo se abordará, mediante un estudio de caso, la problemática en torno al rol de la validación externa en este ámbito disciplinar. Al considerarse los datos adquiridos tanto por la vía tradicional u observacional, como por aquella lograda mediante modelos de simulación, se analizarán los diferentes mecanismos de producción de datos y su eventual reducción en astroinformática. Así, se identificarán aquellas estrategias vigentes de validación en modelos de datos diferentes, estableciendo los vínculos necesarios para una valoración cuantitativa y cualitativa de observaciones y de simulaciones. A partir del inter-juego entre estas últimas se mostrará el estatus y la conformación de la evidencia disponible y su dependencia con el diseño de las observaciones actuales. Se concluirá que la interacción entre modelos de observación y de simulación no sólo contribuyen al desarrollo de guías heurísticas, sino que permiten una retroalimentación favorable en los procesos de validación externa de ambos modelos.

Palabras clave: Observación, simulación, validación, evidencia, astrofísica.

Title: Validation of astrophysical observations and simulations: an epistemological approach.

Abstract. The classical concept of observation in contemporary astrophysics has undergone considerable changes, mainly due to certain observations carried out with computational simulations. In this article, and through a case study, the role of external validation will be analyzed in this field. Different mechanisms of data production and their eventual reduction in astroinformatics will be studied, considering data acquired both through traditional or observational ways or through simulation models. Thus, current validation strategies in different data models will be identified, establishing the appropriate links for a quantitative and qualitative assessment of observations and simulations. From the interplay between observations and simulations, the status and configuration of the available evidence and its dependence on the design of current observations will be shown. It will be concluded that the interaction between observation and simulation models not only contributes to the development of heuristic guides, but also allows profitable feedback in the external validation processes of both models.

Keywords: Observation, simulation, validation, evidence, astrophysics.

¹ Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba (FFyH, UNC) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). E-mail: maxibozzoli@ffyh.unc.edu.ar

² Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (IATE, CONICET) – Observatorio Astronómico de Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba (OAC, UNC). E-mail: dpaz@unc.edu.ar

1. Introducción:

En la medida en que las prácticas astronómicas se han ido sofisticando, a través del desarrollo tecnológico en el instrumental, el concepto de observación tradicional en la astrofísica ha ido perdiendo la capacidad de reflejar diferentes aspectos de relevancia epistemológica. Así, resulta crucial analizar los componentes tecno-científicos asociados a la actividad tanto observacional como simulacional de esta disciplina. Es sabido que la computación está ocupando un rol central en los laboratorios astronómicos actuales y, particularmente, las simulaciones están estableciendo enlaces claves en el procesamiento de la información astronómica disponible.

Recientemente se ha dado una marcada tensión entre los astrónomos que consideran a las simulaciones como genuinas productoras de conocimientos y aquéllos que las toman como meros auxiliares de la observación. A partir de la metamorfosis que ha sufrido la noción clásica de observación, se analizará aquí cómo pueden llevarse a cabo observaciones a través de simulaciones computacionales en la astronomía contemporánea. Precisamente, se mostrará cómo estas prácticas recientes permiten no sólo el desarrollo de guías heurísticas en la resolución de problemas observacionales específicos, sino además la generación de nuevos conocimientos en dicha disciplina científica. Para ello, se explorarán las variadas interconexiones entre las vías observacionales y simulacionales atendiendo, en la medida de lo posible, el importante papel que ocupan las validaciones en ambos casos (Reiss, 2019).

Dentro de este ámbito, se examinará el estatus epistémico de los datos adquiridos por las vías mencionadas anteriormente, abordando los diferentes mecanismos de producción y de reducción en astro-informática. En esta dirección, se analizarán las técnicas afines a la visualización científica requeridas para la formación de la imagen astronómica. A partir de la validación de los procesos y de los resultados arrojados por la observación y por la simulación de un caso astrofísico concreto (The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019) se mostrará la conformación de la evidencia disponible, su estatus y su dependencia con el diseño de las observaciones y de la instrumentación actual (Kosso, 2013; Reiss, 2015).

2. Consideraciones generales sobre observaciones y simulaciones en astronomía

La observación astronómica contemporánea se ha basado principalmente en la radiación electromagnética, o sea, la luz proveniente de los objetos y de los fenómenos del universo. Cada tipo de radiación es diferenciado de otro según un parámetro físico conocido como la longitud de onda. De esta manera, las diferentes clases de telescopios, tanto terrestres como espaciales, pueden captar las ondas de radio, la radiación infrarroja, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Estos sistemas instrumentales están equipados con detectores específicos para cada longitud, extendiendo el espectro visible a rangos invisibles, dándole lugar así a la astronomía multi-onda actual (Longair, 2006).

Sin embargo, la información observacional es también adquirida mediante el estudio de diferentes señales basadas en otras interacciones físicas fundamentales (Bradt, 2004). De este modo, las observaciones vinculadas al estudio de rayos cósmicos, de neutrinos o de ondas gravitacionales suelen ir más allá del alcance de la astronomía observacional tradicional. No obstante, esta última suele proveer las contrapartidas electromagnéticas de aquellos fenómenos exóticos observados. En este sentido, la notable contribución entre ámbitos disciplinares distintos permite el desarrollo de una astronomía de mensajeros múltiples. Esta última muestra un fluido intercambio de la información observacional adquirida por una u otra vía (Bozzoli y Paz, 2016), la cual sirve como soporte evidencial (Hudson, 2014) al momento de caracterizar un objeto, una propiedad del mismo, o bien, un proceso o fenómeno particular.

Como se mencionó en la introducción, la evolución del concepto de observación no solo ha sufrido cambios considerables dentro de la astronomía, sino también en el entorno de su misma reflexión filosófica. El inductivismo del siglo XVII consideraba que la observación que se obtenía mediante los instrumentos era una extensión de la percepción sensible. En su *Novum Organum*, Francis Bacon expone la idea de que instrumentos como el telescopio “reducen” lo no sensible a lo sensible. Él consideraba que la observación indirecta, lograda mediante el empleo de tales dispositivos, era una extensión de lo directamente perceptible. A medida que se fueron perfeccionando estos aparatos con nuevos accesorios, se fueron dejando de lado las diversas maneras de observar “a simple vista” e incluso de “ver a través de” ellos. Así, el desarrollo tecnológico en el instrumental

fue configurando y sofisticando nuevas concepciones de lo que se consideraba una observación astronómica.

Para el empirismo de la primera mitad del siglo pasado, como es sabido, existió una fuerte distinción entre la teoría y la observación, más precisamente, entre los términos teóricos y los términos observacionales. Por términos se entiende aquellas palabras que aluden a ciertos objetos, o a sus respectivas propiedades, las cuales permiten la elaboración de expresiones y la construcción de enunciados científicos. Los términos no teóricos se refieren a entidades observables, es decir, objetos directamente perceptibles que conforman la base empírica. En líneas generales, lo “real” se restringe a lo observable, o sea, sólo a lo que es captado a través de los sentidos. Por otra parte, los términos teóricos designan aquellos objetos pertenecientes al ámbito de las teorías, las cuales proveen la justificación de las creencias epistémicas en torno a tales entidades y a la forma en la cual se las conoce.

No obstante, esta dicotomía ha generado controversias vinculadas tanto a la posibilidad de realizar observaciones físicas (sin presupuestos ni hipótesis teóricas previas) como así también a la necesidad de legitimar el significado de las entidades de las teorías, las cuales no son perceptibles directamente. Más allá de la cuestión de si son o no viables las observaciones puras o pre-teóricas (no guiadas por la teoría), esta última problemática ha sido ampliamente abordada desde diferentes enfoques. Una de las posiciones más extremas del empirismo lógico sostiene que los términos teóricos son reducidos a los datos de la base empírica y su significado es adquirido a través de reglas de correspondencia explícitas, ligadas a la experiencia empírica. Por otra parte, otras perspectivas sostienen que sólo a través de una “definición operacional” se atribuye significado a una cierta entidad teórica, independientemente de la teoría, correlacionándola con hechos experimentales regidos por un procedimiento específico. Otras posiciones sostienen que los términos teóricos pueden ser utilizados como simples instrumentos (sin referencia ni significado) para armar enunciados complementarios a los empíricos, o también, para establecer un contexto y hacer depender su significación del marco teórico que los emplea³. A diferencia

³ Cabe destacar la importancia de la controversia entre posiciones instrumentalistas y realistas, es decir, entre partidarios que abogan a favor de que las teorías no son verdaderas ni falsas sino meros instrumentos con cierto poder predictivo y aquéllos que sostienen que las teorías ofrecen explicaciones certeras de la “realidad”. Si los términos teóricos son instrumentos útiles, aunque no necesariamente verdaderos, el objetivo de las teorías (en tanto se las considere ficciones matemáticas) consistiría en “salvar los fenómenos” o las

de estos tratamientos, los cuales garantizan cierta independencia del significado de los términos observacionales, otras variantes afirman que estos últimos también adquieren sentido al incluirse en el ámbito de la teoría. Más allá de los enfoques mencionados, los cuales han tratado la problemática en torno a la significación de ambos términos, es claro notar que no hay un criterio de demarcación definido entre lo observable y no observable.

Posteriormente, surgieron varias réplicas que atenuaban la distinción teórico-observacional, contribuyendo así a la evolución y a la erosión de lo que se denominó la “concepción heredada” de las teorías. Autores como N. R. Hanson, S. Toulmin, P. Feyerabend, T. S. Kuhn, entre otros, respondieron de distintas maneras en contra de tal dicotomía. En pocas palabras, negaban esta distinción argumentando que las observaciones están “cargadas de teoría”, es decir, que los términos empíricos se hallan impregnados o sub-determinados por las distintas teorías involucradas. Como se mostrará más adelante, en el estudio de caso considerado, para los astrónomos “ver” no siempre es la manera de abordar una observación rigurosa. Por lo general, ellos observan con sistemas instrumentales de altísima sofisticación. Usualmente lo que se observa de esta manera, rara vez puede verse con los ojos. En este sentido, es un lugar común en la reflexión actual la consideración y la ponderación del punto de vista de que la observación está, de alguna u otra forma, cargada de teoría.

En esta dirección, la observabilidad ha sido caracterizada por los/as filósofos/as de las ciencias, a partir de la distinción entre entidades observables y entidades inobservables. Algunos/as sostienen que no hay un criterio de distinción que sea robusto y, por lo tanto, proponen la idea de un “continuo” entre tales entidades (Maxwell, 1989). Otros/as, en cambio, proponen esquemas diferentes de esta dicotomía (van Fraassen, 1980). Varios/as se alejan de esta distinción poniendo énfasis en las interacciones físicas y definiendo que “...lo que cuenta como una observación es una función del estado prevaleciente del conocimiento acerca del mundo físico...” (Shapere 488-489). Otras propuestas (Kosso, 1989, 2006) sugieren hacer hincapié en los procesos involucrados en la adquisición de la información observacional. Precisamente, al identificar y distinguir las diversas formas en

apariencias. Lejos de la discusión clásica, el antirrealismo propuesto por van Fraassen alude a esta expresión para referirse a la adecuación empírica de las teorías y a su veracidad respecto sólo de lo que es observable. Por cuestiones de extensión de este artículo, no se desarrollará este tema; no obstante, se resalta su relevancia.

las cuales se puede obtener tal “información”, se sostiene que la observabilidad posee grados de libertad o dimensiones asociadas a interacciones que no son sólo físicas. En términos generales, este tratamiento afirma que la observación consiste en obtener información del mundo, considerando su transmisión desde la fuente hasta el observador. Cabe destacar que este enfoque distingue dos procesos básicos: la naturaleza de la señal transmitida y la señal como transporte de la información. La primera alude a las interacciones físicas fundamentales, mientras que la segunda hace referencia a aquellas “interacciones” dadas a partir procesos epistémicos variados. El valor de estas últimas se corresponde al contenido informacional adquirido en los reportes observacionales de determinados objetos y de sus respectivos atributos observables.

En este sentido, dado que la observabilidad está relacionada a propiedades cuantificables, otros/as autores/as consideran que en este vínculo sigue habiendo una fuerte dependencia de los objetos físicos involucrados (Chang, 2004, 2005). Según este planteamiento existen numerosas observaciones que no están asociadas a objetos particulares sino a procesos dados, ya sean tanto por relaciones, así como también por correlaciones entre diferentes propiedades observables. Estas últimas pueden asociarse a mediciones de cantidades determinadas que no poseen una referencia concreta con los eventuales objetos involucrados en un hecho o situación observacional particular, la cual es configurada por la escala de observación, la perspectiva y el punto de vista del observador (Bozzoli, 2022). Estas posturas sugieren un corrimiento de nociones de la observabilidad basadas exclusivamente en objetos a otras que contemplan eventos o procesos físicos que incluyen propiedades y relaciones entre ellas. Se sostiene aquí, que el análisis subyacente atenúa el debate filosófico realismo-antirrealismo. Esto se debe a una extensión considerable del ámbito de fenómenos, el cual exhibe no sólo objetos y sus respectivas propiedades, sino además los procesos que emergen de las relaciones entre ellas. Dicha posición conduce, eventualmente, a la aceptación de un realismo de propiedades (Humphreys, 2006, 2013).

A los fines de este artículo, no se desarrollará en detalle este último punto. Sin embargo, admitir este tipo de realismo permite comprender la tensión mencionada antes en la introducción. Precisamente, este último enfoque posibilita la articulación entre ciertas funciones epistémicas de las simulaciones en tanto generadoras de nuevos conocimientos y

simples complementos de la observación. Se considera aquí que la ponderación entre la producción y la reproducción de la información astrofísica es crucial al momento de comparar predicciones de simulaciones computacionales con observaciones particulares.

Algunas investigaciones recientes proporcionan modelos de contraste que intermedian entre los resultados arrojados por tales simulaciones y aquéllos obtenidos por la observación tradicional (Bozzoli y Paz, 2011) (Bozzoli y Stasyszyn, 2018). Esta concordancia se logra a partir de una jerarquía de modelos numéricos involucrados (cosmológicos y semi-analíticos), los cuales se refieren tanto a la estructura del universo a gran escala como al origen de la misma a partir de la formación estelar y de galaxias. Estos últimos modelos contienen datos observacionales como condiciones iniciales y de contorno. La selección y el ajuste de parámetros físicos en las diferentes etapas del modelado permite, por un lado, realizar simulaciones de las observaciones. La reproducción de estas últimas, hace posible la elaboración de catálogos sintéticos (simulados) de galaxias, por ejemplo. Por otro lado, el contraste también se logra a partir de los resultados obtenidos, de forma paralela al de las observaciones, mediante la producción de simulaciones y la adquisición de propiedades observacionales novedosas. De esta manera, la retroalimentación entre una u otra vía, a través del modelo de contraste, permite diversas estrategias de validación entre observaciones y simulaciones, en términos de reproductibilidad y productibilidad epistémica.

Las simulaciones cosmológicas requieren de múltiples modelos o maquetas matemáticas que expliquen y den cuenta de una variedad de fenómenos astrofísicos involucrados. Dichas simulaciones modelan lo que ocurre con ciertas propiedades físicas de la “materia oscura”, tales como su forma, a partir de condiciones iniciales dadas por observaciones como las de la radiación de fondo de microondas, entre otras. Asimismo, se incluye un modelo que reproduce la gravedad. Ello permite describir tanto la formación de la estructura del universo a gran escala, como la evolución del mismo, en condiciones similares a las observadas. Por otra parte, los modelos semi-analíticos incluyen reglas o “recetas” que involucran diferentes parámetros empíricos. Aunque estos últimos modelos permiten simular la formación de las galaxias, la cual ocurre a una escala cosmológica, también resultan afectados por la formación de estrellas, la cual se da a escalas más pequeñas del orden del sistema solar. Por este motivo, no hay un modelo de simulación con

tal poder de resolución que pueda reproducir la física tanto de la formación de las galaxias (y su dependencia de la formación estelar), como de la formación y evolución del universo a gran escala. Así, los modelos semi-analíticos emplean fórmulas de procesos astrofísicos que asignan a los “puntos” de una simulación de partículas, reglas y atributos empíricos del campo (como los filamentos que conectan las galaxias de un cúmulo, por ejemplo) que cada uno de estos puntos ocupa.

Lo mencionado anteriormente motiva a aceptar un concepto de observación afín a las prácticas más recientes de esta disciplina. Tal noción se apoya en las propiedades obtenidas tanto por las vías observacionales clásicas, como por aquéllas computacionales. En esta dirección, como se pretende mostrar en lo que sigue, pueden llevarse a cabo observaciones a través de simulaciones. A partir de las interacciones entre ambas vías, a través de los diferentes instrumentos y mecanismos de producción de datos involucrados, resulta factible establecer estrategias de validación externa entre ellas.

3. Argumentos a favor de la validación externa

Algunos autores consideran que la validación externa, en tanto extrapolación, es un problema menor en los enfoques epistemológicos actuales. Reiss (2019) acuerda con esta postura, no obstante, sostiene que esta problemática se debe a otras cuestiones y no a que la misma haya sido ignorada por la filosofía de la ciencia. Precisamente, este autor señala que los tratamientos recientes de la validez externa apuntan a un razonamiento limitado de la evidencia. Así, él propone una manera alternativa de abordar esta cuestión apelando a una explicación diferente, que contribuya tanto al modelado del sistema como al del objetivo específico planteado en la investigación. Para ello, Reiss sostiene que las inferencias causales en términos de validez (interna y externa) conducen a un pensamiento evidencial pobre. Cualquier afirmación que se haga respecto del modelo del fenómeno de interés (*target system*), para que pueda ser validada externamente, debería establecerse otra afirmación análoga asociada a otro modelo (*model system*) sobre el cual pueda experimentarse, por ejemplo. A diferencia de este enfoque, Reiss sostiene que el modelo del fenómeno bajo investigación debería comenzar con una hipótesis y plantearse qué tipo

de evidencia es necesaria para establecerla definitivamente, más allá de la evidencia sugerida por el modelo alternativo.

La validez externa suele estar caracterizada en contraposición con la validez interna y se define en términos de esta última, la cual se refiere a su vez a las inferencias asociadas a tratamientos que marcan pautas en una instancia específica de la práctica experimental. A grandes rasgos, la validez externa intenta generalizar las influencias causales vinculadas a los efectos físicos observados en un caso particular. En esta dirección, algunos autores caracterizan la validez a partir de la similitud (Guala, 2003) entre los factores causales conocidos que interactúan con los fenómenos producidos en un experimento dado (validez interna) y aquéllos que operan en otros sistemas bajo un conjunto de diferentes circunstancias de interés (validez externa).

Por otro lado, la extrapolación como una manera de validación externa en distintos ámbitos científicos permite describir las inferencias propiamente dichas, es decir su forma o diseño, en vez de las propiedades que son inferidas. En este sentido, Reiss destaca la importancia del entendimiento básico del mismo proceso inferencial que subyace en el tratamiento de la evidencia disponible. Según este autor, se realiza una primera inferencia sobre un sistema experimental/observacional particular. Luego, se establece una segunda inferencia en base al conocimiento adquirido de este último para así determinar cierto conocimiento sobre otros sistemas relacionados. Esta distinción se corresponde, por un lado, a un modelo del fenómeno que puede ser accedido epistémicamente y, por el otro, a un modelo que es el objeto de estudio y al cual no puede accederse por diferentes razones experimentales (éticas o interventivas, entre otras). Según este autor, el problema de la validación externa tiene que ver con realizar inferencias confiables sobre los sistemas bajo investigación, los cuales no son estudiados de forma directa, sino que lo son indirectamente al examinar los modelos alternativos. Dado que las aserciones hechas por ambos modelos son afirmaciones causales, las diferencias básicas que muestran permiten cierta articulación del mecanismo inferencial. Ello posibilita el aprendizaje del sistema bajo investigación, a través del aprendizaje de situaciones de control y de manipulación de las variables presentes en la parametrización del sistema alternativo. No obstante, la extrapolación asociada al salto inferencial de un modelo a otro no es trivial y por ello es complicado resolver el problema de la validación externa.

Reiss describe una serie de estrategias que permiten dar una resolución aproximada a este problema. Por un lado, la inducción es empleada por una variedad de científicos en casos muy específicos. De esta manera, una afirmación que es legítima en un modelo alternativo, también se mantiene en ciertas instancias en aquel modelo del fenómeno que se intenta investigar. En este sentido, esta estrategia arroja inferencias ampliativas poco confiables, conduciendo eventualmente a una extrapolación errónea. No obstante, el salto inferencial de un modelo a otro suele estar justificado según este esquema en condiciones concretas particulares. Por otra parte, una forma de caracterizar la extrapolación es a través de un razonamiento por analogía. Según él, esta última no proporciona una aproximación más confiable con respecto a la inducción. Así, no hay razones convincentes para creer que efectivamente la afirmación de lo que causa un efecto en un modelo, lo sea en el otro. Sin embargo, Guala (2005) sostiene que hay cierta similitud entre las inferencias logradas en ambos modelos. Ello significa que, aunque la extrapolación adquiera cierto grado de desconfianza, la misma puede ser contrarrestada si la evidencia experimental disponible fue generada por sistemas o mecanismos de producción semejantes; o sea, donde las posibles fuentes de error para una validación externa hayan sido consideradas a través de un diseño específico. A diferencia, Reiss sostiene que el problema en torno de la justificación de las extrapolaciones permanece, ya que por más similares que sean un modelo con respecto a otro, no pueden determinarse todos los aspectos que influyen en la producción del soporte evidencial. No obstante, Guala (2010) sostiene que tal similitud entre modelos está sujeta al estado actual del conocimiento. Este último contexto permite que en la selección y en el ajuste de las variables de cada modelo, las mismas pueden relacionarse causalmente, o bien, correlacionarse de tal forma que posibilite estimar el grado de probabilidad de que una causa dada pueda producir un cierto efecto. Tal parametrización permite además comparar la covarianza de un conjunto de modelos alternativos y así determinar los valores de cada uno de los parámetros del modelo del fenómeno bajo investigación. Tanto los efectos causales de una variable sobre otra, como las correlaciones entre ellas, pueden ser representadas. No existe un principio general que dé cuentas de la combinación entre las variables de un modelo, o sea, no hay una regla a seguir en tales prácticas de parametrización. Además, existen factores que interactúan en una determinada relación

causal, haciéndola depender de elementos propios del modelado como sesgos o prejuicios epistémicos. Debe disponerse de suficientes datos para estimar el peso de dichos factores.

Por otra parte, siguiendo a Reiss, las relaciones causales presentes en los modelos de fenómenos físicos conducen a estructuras complejas, las cuales pueden interpretarse como una disposición de mecanismos. Así, la extrapolación permite rastrear los procesos inferenciales y definir su configuración en el modelo de interés. Ello significa que los investigadores pueden no sólo decir que un parámetro causa otro en el mismo modelo, sino además descubrir el proceso causal subyacente y así compararlos con los mecanismos ocultos presentes en otros modelos. Según este autor, la estrategia de rastreo procesual comparativo se basa en la idea de que un proceso causal dado puede reproducirse en otros modelos, conduciendo siempre al mismo efecto. No obstante, los científicos deben conocer cuáles son los límites de los mecanismos y en que instancias probables de cada modelo pueden diferir. Otra estrategia de validez externa, similar a esta última, no consiste en comparar la estructura de las relaciones causales subyacentes, sino establecer cuál es la ingeniería por detrás de los modelos involucrados. Esto quiere decir que el diseño del sistema experimental, inherente al modelo objetivo como a los alternativos, ocupa un rol fundamental a la hora de poder validarlos. En el ejemplo que se desarrollará más adelante, se destacará este aspecto crucial que concierne a la arquitectura de una situación o de un hecho observacional particular. Factores como la escala de observación, la perspectiva y el punto de vista deben ser considerados indispensables a fin de examinar las condiciones iniciales y de contorno detrás de cada modelo. En este estudio de caso, a través de modelos de simulación computacional se reproducen aquellas observaciones logradas por modelos tradicionales. Estos últimos no son accesibles, en el sentido de que es inviable llevar a cabo intervenciones rigurosas sobre fenómenos astrofísicos concretos. A diferencia, los modelos numéricos poseen cierta capacidad experimental, lo que les permite producir observaciones virtuales, cuyos resultados son extrapolados al modelo observacional del fenómeno bajo investigación. En esta dirección, otra de las estrategias planteadas por Reiss tiene que ver con los experimentos de campo. A los propósitos aquí presentes, sólo se intentará examinar algunos aspectos afines a las prácticas astronómicas actuales. Una cuestión importante inherente a la validación externa se corresponde a rasgos idiosincráticos que pueden eventualmente dificultar la extrapolación, o sea, el salto inferencial de un modelo a otro.

Como se mostrará en el ejemplo considerado, algunas características metodológicas son tomadas en cuenta para la eliminación de sesgos y no contaminación de la muestra, a saber: la división del trabajo de investigación en cuatro equipos desvinculados que emplean tanto simulaciones, como observaciones. Cada una de estas vías, tienden a producir resultados que poseen una alta probabilidad de ser internamente válidos, lo cual se debe a que los astrónomos ejercen cierto grado de control sobre estos modelos. Sin embargo, estos últimos no están exentos de errores (*artefacts/bias*) generados por el mismo modelador, incluso aquellas investigaciones observacionales donde no hay estrictamente una intervención.

4. Argumentos en contra de la validación externa

Reiss (2019) sostiene que pensar en términos de la validez externa conduce a un mal razonamiento de la evidencia. No obstante, como se ha mencionado en la sección anterior, el uso de diferentes estrategias de extrapolación presenta una serie de limitaciones, las cuales no son suficientes para abandonar su empleo en las prácticas observacionales y experimentales más recientes. Según este autor, el problema va más allá de una cuestión meramente metodológica. El mismo se remite a un análisis epistemológico enmarcado en un tratamiento fundacionalista de las inferencias. Comprender la extrapolación como un salto inferencial, de un modelo a otro, requiere de algún tipo de justificación. En pocas palabras, la validación externa consiste en adquirir conocimientos de un sistema dado examinando otro, diferente pero relacionado, para luego inferir propiedades físicas del fenómeno bajo estudio a partir de diferentes atributos aprendidos en el modelo alternativo. Como se ha dicho, el beneficio epistémico de este mecanismo hace referencia a modelos que, por cuestiones experimentales o éticas, no pueden ser accedidos, o por lo menos, no directamente. Para Reiss este esquema representa una desventaja que advierte un alto costo al sustituir las inferencias de un modelo por las de otro similar. Para los investigadores que defienden la extrapolación, el estatus epistémico de una hipótesis causal de un modelo particular, adquirida a través de otro, es más confiable que a través del mejor método disponible para investigar el objetivo de manera directa. La extrapolación posee al menos dos incertidumbres básicas: por un lado, la certeza de las inferencias internas de un modelo y, por el otro, la veracidad de las inferencias propias del salto de un modelo al otro. Ambos

mecanismos deben ser, separadamente, más o menos confiables. Este autor identifica un “experimentalismo” basado en una metodología fundacionalista, la cual sostiene que las estrategias inferenciales empleadas en las prácticas son intrínsecamente confiables. Ello significa que el uso de estos métodos no requiere de justificación alguna, debido al eventual éxito en diferentes estudios de caso. Las creencias epistémicas básicas evaluadas por un método de estas características, ya están justificadas. Así, otras creencias más sofisticadas deben derivarse de aquéllas elementales para lograr también su propia valoración.

Reiss sostiene que la perspectiva fundacionalista tiende a una epistemología defectuosa. Según él, es claro que la problemática asociada a la validación externa de modelos no hubiera sido objeto de análisis filosófico, si los científicos nunca hubieran empleado dichos esquemas de razonamiento. A diferencia del fundacionalismo, este autor propone una alternativa de tipo pragmatista donde el peso de la prueba de las justificaciones es relativo a un contexto y no recae sobre sistemas de creencias independientes. En esta dirección, el conocimiento de fondo permite distinguir entre las garantías epistémicas de una hipótesis y su apoyo evidencial. Este último recopila la información relevante disponible a fin de poder evaluar la hipótesis en cuestión; mientras que dichas garantías están asociadas al grado de justificación, el cual se basa en un cuerpo de evidencias general. Esta perspectiva es similar a los tratamientos confiabilistas de la noción de evidencia. Reiss menciona que tal soporte puede ser directo, o bien, indirecto. Bajo el supuesto de que una hipótesis dada es verdadera, el primer caso alude al reconocimiento de patrones en bases de datos que brindan apoyo a la misma. Dado el hecho de que tal base exhibe una multiplicidad de patrones, el segundo caso se refiere a la incompatibilidad entre éstos y aquellas hipótesis alternativas, conformando así un soporte contra-evidencial. De esta manera, la evidencia contraria a las hipótesis alternas provee un apoyo indirecto a favor de la hipótesis principal o de interés. Este enfoque pragmático suministra una justificación de tipo contextual, es decir, en base a la información concreta sobre el contenido de lo que se pretende validar, por ejemplo: ciertas relaciones o correlaciones entre variables, o bien, procesos causales específicos vinculados a parámetros del modelo del fenómeno bajo investigación. De esta forma, el grado de evidencia de una hipótesis dada dependerá de los soportes ya mencionados. Así, la garantía de esta hipótesis será proporcional al número de aquéllas alternas que son finalmente descartadas. El contextualismo propuesto por Reiss

sugiere que las extrapolaciones empleadas en la validez externa de modelos poseen un rol heurístico, solamente. La información extraída de los modelos alternativos no provee ningún respaldo confiable al modelo investigado. Por ello, este autor deja de lado cualquier consideración sobre la efectividad que pueda llegar a tener la validación externa, sin importar si los modelos involucrados alcanzan cierto poder predictivo o explicativo, unos sobre otros. Sin embargo, él reconoce por lo menos una limitación de su propuesta. La misma tiene en cuenta que el soporte directo, por sí solo, no alcanza para establecer un apoyo considerable. Ello significa que la evidencia directa, de forma única, no proporciona ninguna garantía a la hipótesis principal. Necesariamente, se requiere un contraste con otras hipótesis secundarias, sobre todo cuando otros soportes directos no están disponibles. También es difícil descartar las hipótesis alternativas vinculadas a un modelo particular, dado que la sofisticación de los procesos causales no permite identificar las causas comunes u ocultas más probables que generan un fenómeno dado. La evidencia arrojada por un modelo secundario no justifica la hipótesis enunciada en un modelo principal, pero la información extraída puede servir como una guía para la formulación de nuevas hipótesis.

5. Validación de observaciones y simulaciones del núcleo de M87

Un caso paradigmático de la astronomía actual es la observación que se realizó en torno al núcleo de la galaxia elíptica M87, mediante la utilización del telescopio de horizonte de eventos (EHT). En particular, esta galaxia es uno de los candidatos más cercanos a la tierra para hospedar en su núcleo un agujero negro supermasivo. Las observaciones realizadas en 1918 por el eminente astrónomo Heber Curtis habían revelado una estructura de materia en forma de chorro emergiendo de este objeto astrofísico. Décadas después se conjeturaba que tal fenómeno evidenciaba indirectamente la presencia de un agujero negro cuya masa se estimaba que era miles de veces mayor a la masa solar [Fig. 1]. Dada su cercanía, esta galaxia es uno de los objetos con mayor diámetro angular observado hasta ahora. De esta manera, se infiere que la observación del agujero negro en su centro, tendría un diámetro angular del orden de 10 microsegundos de arco. Por ello, se requiere para su observación instrumental con un poder resolvente sin precedentes. Los resultados de la observación de M87 por el EHT fueron publicados en un volumen especial con seis artículos seminales,

donde se describen todos los aspectos y fases del proceso de observación y de análisis de este objeto. Este volumen forma parte de la colección de *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 875. Cada uno de los trabajos (artículos) cuenta con más de 300 autores en orden alfabético, no habiendo un autor correspondiente para cada artículo⁴.

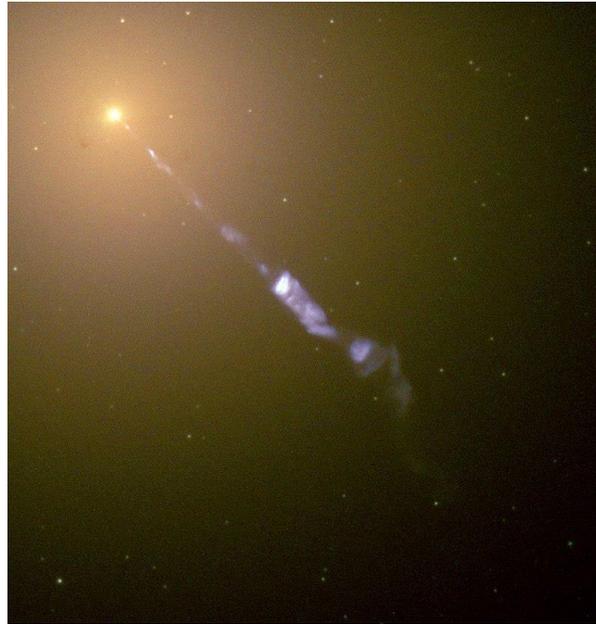


FIGURA 1. Chorro (*jet*) de materia emergiendo del núcleo galáctico de M87 (NGC 4486). Este fenómeno posee una extensión aproximada de 20 segundos de arco (5000 años luz). Composición de imágenes obtenidas por el Telescopio Espacial Hubble (HST). Créditos: J. A. Biretta, W. B. Sparks, F. D. Macchetto y E. S. Perlman (STScI). NASA y *The Hubble Heritage Team* (STScI / AURA) – Dominio Público.

En el primer trabajo (artículo I), se describe la construcción y puesta a punto de este gran radiotelescopio, el cual involucra la combinación de otros en un único instrumento equivalente al de una antena del orden del tamaño del diámetro terrestre [Fig. 2].

⁴ En adelante se hará referencia sólo a cada artículo, utilizando la notación de la revista en números romanos.

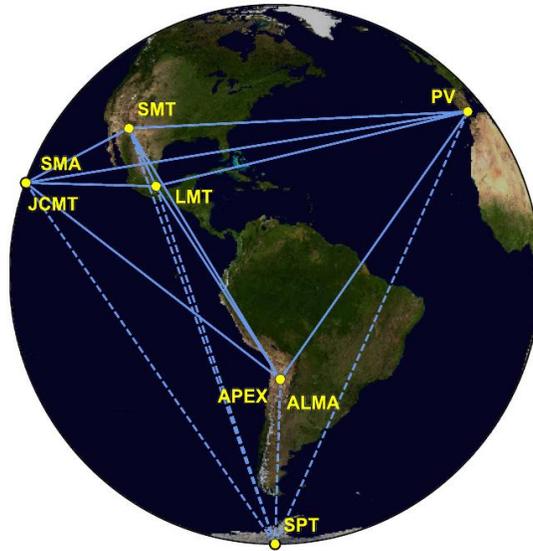


FIGURA 2. Locaciones en tierra de las ocho estaciones que conforman el Telescopio Horizonte de Eventos (EHT).
Créditos: *The Event Horizon Telescope Collaboration*, bajo autorización *Creative Commons Attribution 3.0*
(<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

Las nociones físicas y matemáticas necesarias para obtener la resolución angular requerida son bien conocidas desde hace cien años. Éstas se basan en la descomposición de una señal electromagnética en determinadas longitudes de onda en dos o más antenas receptoras, separadas a una cierta distancia. El poder resolvente del sistema de antenas está establecido por la teoría, considerando estas longitudes. Los conceptos a los que se hace referencia derivan de una aplicación clásica de la teoría del electromagnetismo, la cual cuenta con un formalismo matemático basado en el análisis de Fourier. No obstante, el desafío que presenta configurar un radiotelescopio de este tamaño, logrando combinar de manera coherente antenas que se encuentran separadas por distancias continentales, no tiene antecedentes en la historia de la astronomía. Para tomar una dimensión concreta de ello, basta con decir que la distancia entre las antenas debe conocerse con una precisión menor a la del milímetro, ya que la longitud de onda de la radiación para este caso es milimétrica. Además, los tiempos en los que debe registrarse la variación de la señal entrante en cada antena, tienen que ser tales que permitan distinguir un intervalo temporal equivalente a una fracción de milímetro de la longitud dividido por el valor de la velocidad de la luz (300.000 km/s). Esto requiere el empleo de relojes atómicos de alta precisión

(nano segundos) y, además, la velocidad en el registro y escritura de la señal plantea desafíos tecnológicos importantes.

La técnica de interferometría de base muy larga (VLBI), si bien ha sido desarrollada durante los últimos veinte años (Falcke et al., 2000), ha tenido que ser minuciosamente perfeccionada (artículo II) para realizar la observación de M87. El rango de longitudes de onda milimétrico, necesario para observar esta galaxia, también plantea dificultades debido a que resulta sensible a distorsiones atmosféricas y de temperatura locales a cada antena. De esta manera, se requiere una calibración instrumental sumamente sofisticada y una parametrización precisa de la situación de observación. Ello conduce a modelar y medir una amplia variedad de parámetros físicos, tales como: la turbulencia atmosférica, la meteorología local y global, los gradientes de temperatura de cada antena, la geolocalización de estas últimas con una precisión por debajo del milímetro y también la sincronización temporal al nano segundo de todos los registros, entre otros.

Además, cabe destacar la tecnología desarrollada para poder grabar y digitalizar las señales de radio de las antenas a la velocidad y resolución requeridas para la observación de M87. Así, se diseñaron elementos de electrónica y dispositivos de almacenamiento que superaron en un orden de magnitud a aquellos con los que se contaba en la industria informática del momento (artículo II). En consecuencia, fue necesaria la inversión de varias naciones durante más de una década en infraestructura, investigación y desarrollo tecnológico. Este proyecto se convirtió en uno de los casos más imponentes de ciencia grande (*big science*) en astronomía. De esta manera, la observación del núcleo de dicha galaxia, tiene como objetivo construir por primera vez la imagen de un agujero negro supermasivo, el cual se presume su existencia desde hace décadas en la astronomía extragaláctica contemporánea.

El propósito principal del EHT es obtener imágenes de los horizontes de eventos de agujeros negros centrales en galaxias cercanas. En pocas palabras, se puede describir tal horizonte como una región esférica alrededor de un agujero negro, de la cual no es posible que escape ni siquiera la luz. Autores como “MTW” (Misner, Thorne y Wheeler, 1973), sostienen que debería observarse como una sombra en contraste con su entorno. Asimismo, las distorsiones espacio-temporales circundantes producen, eventualmente, deflexiones de los rayos de luz cercanos; este es un efecto conocido como “lente gravitacional”. Dado que

tal candidato emite un chorro de materia se estima que se encuentre rodeado por un disco que actúa como fuente, el cual alimenta a su vez al agujero negro central. Dicho mecanismo astrofísico ha sido motivo de debate no sólo en el campo teórico. Actualmente, gracias a estas recientes observaciones, se extiende este ámbito de investigación (artículo V). La idea comúnmente aceptada por la comunidad es que parte del material que cae del disco de acreción al agujero negro sufre una aceleración y una colimación. Ambas son originadas por la combinación de intensos campos magnéticos y por el efecto de arrastre rotacional del espacio-tiempo circundante al agujero negro (lo que se conoce como ergoesfera, según MTW). Sin entrar en más detalles técnicos, cabe decir que el chorro (*jet* emergente) es evidencia suficiente para tener una leve noción de cómo debería ser la imagen de M87. Esta es una idea fervientemente arraigada en la comunidad astrofísica desde hace años. Así, se esperaba que tal imagen posea la apariencia de una sombra sobre un disco de acreción de materia, la cual estaría altamente perturbada por el efecto de una fuerte lente gravitacional (artículo IV).

Utilizando la señal digital grabada en cada antena de la red que conforma el EHT, se procesan los registros de manera tal que se obtiene un patrón de interferencia conocido como la “visibilidad”. La manera en que se realiza este patrón de interferencia es totalmente digital, a diferencia de los radiotelescopios tradicionales que sólo utilizan circuitos electrónicos para intervenir las señales analógicas. Este procedimiento requiere una delicada calibración y, al ser un proceso digital, permite la intervención y ajuste de parámetros con una mayor flexibilidad que las técnicas electrónicas, a fin de maximizar la señal (artículo III). La visibilidad así obtenida, es una función matemática de solo algunas de las frecuencias espaciales que conforman la imagen del objeto observado [FIG. 3].

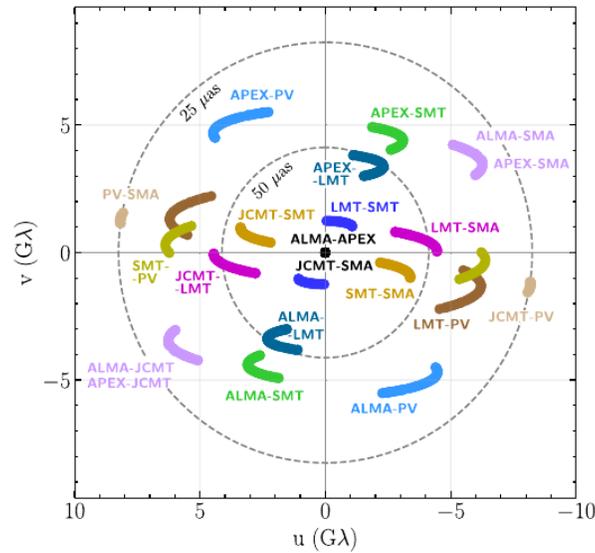


FIGURA 3. Representación del dominio de frecuencias espaciales muestreado por el EHT. En colores se indican las regiones donde se determina la visibilidad. Como puede notarse, la cobertura es parcial e incompleta. Créditos: *The Event Horizon Telescope Collaboration*, bajo autorización *Creative Commons Attribution 3.0* (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

Este concepto es común en radioastronomía, ya que a diferencia de los telescopios ópticos que forman una imagen del objeto sobre su plano focal, en los radiotelescopios las imágenes no se obtienen de manera directa, sino a partir de tal visibilidad. De manera equivalente, la visibilidad es por construcción el registro de las frecuencias espaciales de la transformada de Fourier de la imagen. Sin entrar en detalles matemáticos resta decir que, en el formalismo de Fourier, para reconstruir la imagen del objeto observado, se requiere conocer no sólo algunas de las frecuencias registradas, sino todas las frecuencias espaciales del dominio de dicha función (este proceso se denomina deconvolución). No obstante, debido a que el EHT sólo registra una porción, el proceso de reconstrucción de la imagen es lo que se conoce en física como un problema mal definido. Ello se debe a que, debido a la falta de información, existen matemáticamente infinitas imágenes que pueden producir el mismo patrón de visibilidad observado (artículo IV). Por esta razón, en radioastronomía se recurren a técnicas de reconstrucción de imágenes que utilizan diferentes parámetros para introducir información y permitir la deconvolución del patrón de visibilidad de una imagen.

En esta dirección, los cuatro equipos de investigación independientes del EHT (artículo IV) utilizaron dos métodos diferentes de reconstrucción (CLEAN y RNL). La selección y el ajuste de los parámetros antes mencionados requieren además de la utilización de simulaciones computacionales [Fig. 4].

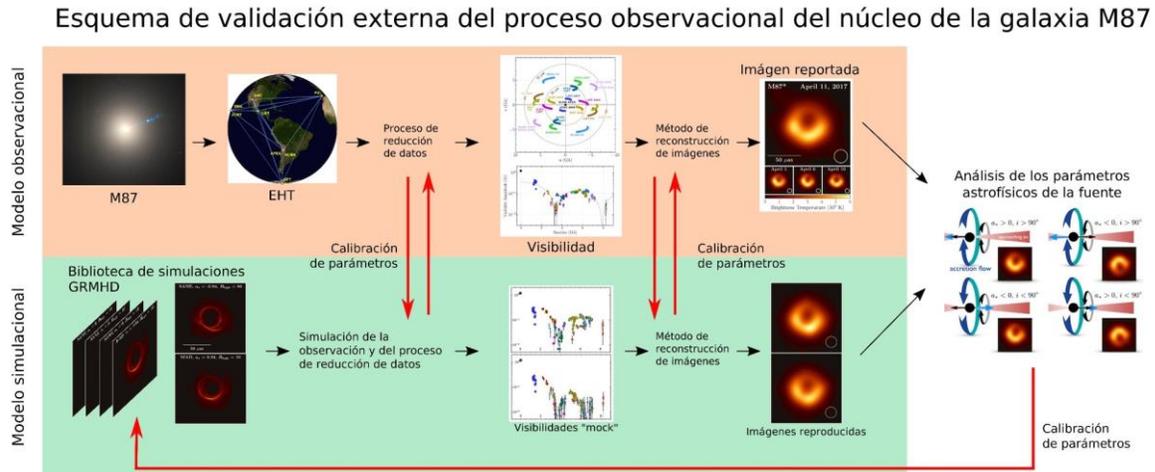


FIGURA 4. Interacciones y validaciones entre los modelos observacional y computacional.

En palabras de los mismos investigadores, las simulaciones computacionales han jugado un rol protagónico en la capacidad de componer la imagen del núcleo de M87, como así también en la interpretación de los mecanismos astrofísicos subyacentes (artículos V y VI). Una primera capa de este modelo consiste en la producción de múltiples simulaciones del disco de acreción alrededor de un agujero negro con rotación. Para esto, se emplean la teoría de la relatividad general en combinación con la teoría magneto-hidrodinámica de plasmas (GRMHD). Existe una amplia variedad de parámetros físicos en torno del fenómeno en cuestión, los cuales son explorados mediante las simulaciones GRMHD, conformando así una biblioteca de éstas. Por otro lado, resultados preliminares de la observación de M87, por el radiotelescopio, validan inicialmente el modelo de simulación en esta etapa. Más concretamente, de los datos preliminares se dedujo que el agujero negro tendría un radio de horizonte de eventos del orden de los 50 microsegundos de arco. Este parámetro físico restringió el rango de valores empleados en dichas simulaciones. Luego, se produjeron imágenes ideales de los agujeros negros simulados, las cuales fueron reproducidas a través de observaciones virtuales. Estas últimas tienen en cuenta aquellos

parámetros que configuran una situación de observación particular. Los valores de algunos de estos últimos son conocidos, ya que fueron medidos durante la misma observación, mientras que otros no. En esta instancia, se posee un conjunto de “visibilidades” virtuales (MOCK) análogas a las registradas por el EHT durante la observación. A estas últimas, se le aplican las dos técnicas de reconstrucción de imágenes consideradas por los equipos de investigación. Al considerar una simulación de la biblioteca, se busca la parametrización con mayor éxito en el proceso de reconstrucción de imágenes, comparando la imagen ideal con la virtual o *mock*. Este conjunto de parámetros se aplica, a su vez, sobre la visibilidad medida para reconstruir una imagen de M87. De esta manera, para cada simulación de la biblioteca se posee un *set* de parámetros óptimo y, para éste, una imagen reconstruida a partir de la visibilidad medida del objeto. Cada par de imágenes, simuladas y observadas, es comparado y clasificado según su grado de verosimilitud. Así, a partir del mejor par de imágenes, se elige la imagen reportada de la observación del núcleo de la galaxia M87.

6. Conclusión:

El estudio de caso considerado muestra la sofisticación de los procesos observacionales actuales en la astronomía. La observación de un fenómeno astrofísico particular, entendida como un proceso general, integra tanto modelos de observación como de simulación. Dichos modelos se encuentran estrechamente vinculados, cruzándose eventualmente en las distintas instancias de la investigación, exhibiendo la necesidad de una validación interna y externa, permanente. Así, resulta claro la implementación de esquemas de razonamiento basados en estrategias inferenciales como la analogía, la similitud y la comparación de relaciones y correlaciones causales entre las variables presentes en las parametrizaciones de cada modelo involucrado. En este trabajo se sostiene que los diferentes mecanismos de extrapolación empleados en el ejemplo, muestran lo imprescindible del uso de modelos alternativos. Éstos ofrecen grandes bases de datos las cuales, una vez estandarizadas, conforman un soporte de evidencias común.

A diferencia del enfoque de Reiss (2019), dichos soportes disponibles no sólo sugieren información relevante o guías heurísticas para la generación de nuevas hipótesis, sino que ofrecen una dinámica procesual entre un modelo de observación y otro de

simulación. La articulación entre ambos modelos es indispensable, a tal punto que no hay una línea de demarcación entre uno y otro. Más precisamente, puede resaltarse que los roles de ambos modelos fluctúan. Esto significa que, en las distintas etapas del proceso observacional, un modelo puede ser objetivo o primario y en otra alternativo o secundario, y viceversa. De esta manera, se considera aquí que la perspectiva propuesta por este autor es monocromática y altamente influenciada por una casuística orientada sólo a las ciencias médicas, la cual no es aplicable a otras disciplinas como la astronomía observacional.

Agradecimientos:

Se agradece a los/as evaluadores/as anónimos/as por los comentarios y por las sugerencias realizadas. Sin este aporte, no hubiera sido posible las correcciones del presente artículo.

7. Referencias:

- Bozzoli, M., Paz, D. “La autonomía de los modelos en astronomía”. *Representación en Ciencia y Arte*. Andrea Torrano y Antonio Pasos Videira (comps.). Vol. 3, (2011): 63-71. Córdoba: Editorial Brujas.
- Bozzoli, M., Paz, D. “Evidencia y observabilidad en las prácticas astronómicas”. *Representación en Ciencia y Arte*. Luciana Samamé, Luis Miguel Peris Viñé y Fernando Ferrari (comps.). Vol. 5, (2016): 355-366. Córdoba: Editorial Brujas.
- Bozzoli, M., Stasyszyn, F. “Cambios de representaciones visuales en cosmología observacional”. *Filosofía e Historia de la Ciencia en el Cono Sur. Selección de trabajos del XI Encuentro*. María de las Mercedes O’Lery, Lucía Federico, y Yefrin Ariza (eds.). (2020): 123-139. São Carlos–Buenos Aires: AFHIC.
- Bozzoli, M. “Observaciones y clasificaciones en astronomía”. *Epistemología e Historia de la Astronomía. Volumen I*. Maximiliano Bozzoli, Luis Salvatico y David Merlo (eds.). Vol. I, (2022): 9-38. Córdoba: Editorial de la Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Filosofía y Humanidades.
- Bradt, H. *Astronomy Methods: A Physical Approach to Astronomical Observations*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- Chang, H. *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- Chang, H. “A Case for Old-Fashioned Observability, and a Reconstructed Constructive Empiricism”. *Philosophy of Science*. Vol. 72, No. 5, (2005): 876-887.
- Falcke, H.; Melia, F.; Agol, E. “Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center”. *The Astrophysical Journal*. Vol. 528, (2000): L13-L16.

- Guala, F. “Experimental localism and external validity”. *Philosophy of Science*. Vol. 70, (2003): 1195-1205.
- Guala, F. *The methodology of experimental economics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- Guala, F. “Extrapolation, analogy, and comparative process tracing”. *Philosophy of Science*. Vol. 77, N° 5, (2010): 1070-1082.
- Hudson, R. *Seeing Things: The Philosophy of Reliable Observation*. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- Humphreys, P. *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- Humphreys, P. “What are Data About”. *Computer Simulations and the Changing Face of Experimentation*. E. Arnold and J. Durán (eds). (2013): 12-28. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing.
- Kosso, P. *Observability and Observation in Physical Science (Synthese Library)*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989.
- Kosso, P. “Detecting Extrasolar Planets”. *Studies in History and Philosophy of Science*. Vol. 37, (2006): 224-236.
- Kosso, P. “Evidence of dark matter, and the interpretive role of general relativity”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. Vol. 44, (2013): 143-147.
- Longair, M. *The Cosmic Century: A History of Astrophysics and Cosmology*. New York: Cambridge University Press, 2006.
- Maxwell, G. “El Estatus Ontológico de las Entidades Teóricas”. *Filosofía de la Ciencia: Teoría y Observación*. L. Olivé y A. R. Pérez Ransanz (trad. y eds.). México: Siglo XXI Editores – UNAM, 1989.
- Misner, C. W.; Thorne K. S.; J. A. Wheeler. *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1973.
- Reiss, J. *Causation, evidence, and inference*. New York: Routledge, 2015.
- Reiss, J. “Against external validity”. *Synthese*. Vol. 196, No. 8, (2019): 3103-3121.
- Shapere, D. “El Concepto de Observación en Ciencia y en Filosofía”. *Filosofía de la Ciencia: Teoría y Observación*. L. Olivé y A. R. Pérez Ransanz (trad. y eds.). México: Siglo XXI Editores – UNAM, 1989.
- The EHT Collaboration et al. “The Shadow of the Supermassive Black Hole”. *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 875, No. 1, (2019): 1-17.
- The EHT Collaboration et al. “Array and Instrumentation”. *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 875, No. 1, (2019): 1-28.
- The EHT Collaboration et al. “Data Processing and Calibration”. *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 875, No. 1, (2019): 1-32.
- The EHT Collaboration et al. “Imaging the Central Supermassive Black Hole”. *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 875, No. 1, (2019): 1-52.
- The EHT Collaboration et al. “Physical Origin of the Asymmetric Ring”. *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 875, No. 1, (2019): 1-31.
- The EHT Collaboration et al. “The Shadow and Mass of the Central Black Hole”. *The Astrophysical Journal Letters*. Vol. 875, No. 1, (2019): 1-44.
- van Fraassen, C. B. *The Scientific Image*. Oxford: Oxford University Press, 1980.