

**ASPECTOS EPISTEMOLÓGICOS SOBRE LA VALIDACIÓN DE
MODELOS COMPUTACIONALES EN COSMOLOGÍA**

***EPISTEMOLOGICAL ASPECTS ON THE VALIDATION OF
COMPUTATIONAL MODELS IN COSMOLOGY***

MAXIMILIANO BOZZOLI

maxibozzoli@ffyh.unc.edu.ar

CONICET - Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

MARIANO J. DOMÍNGUEZ

mariano.dominguez@unc.edu.ar

CONICET - Observatorio Astronómico de Córdoba
Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

RECIBIDO: 10/10/2023

ACEPTADO: 24/11/2023

Resumen: Los modelos de simulación computacional están vinculados a los resultados obtenidos observacionalmente, logrando así su validación de diversas maneras. Así, las simulaciones cosmológicas hacen posible la generación de modelos de contraste, los cuales permiten la comparación entre los datos simulados con aquéllos alcanzados por la vía tradicional. Al no haber un solo protocolo de validación, las prácticas son heterogéneas. Una de las estrategias consiste en validar inicialmente las simulaciones con datos observacionales, otra alcanza la validación a través de la parametrización conforme a nuevos datos disponibles. Debido a que los resultados de las observaciones y de las simulaciones son comparables entre sí, ellos poseen el mismo estatus epistémico. Esto permite que sean viables observaciones a través de simulaciones. A partir de los modelos de contraste logrados, se concluirá que es factible el empleo de técnicas horizontales de validación entre simulaciones, en particular, entre el modelo cosmológico estándar y modelos alternativos.

Palabras clave: Prácticas científicas; validación; observación; modelos de simulación; cosmología

Abstract: Simulation models are closely linked to the results got from observational means, achieving their validation in different ways. Thus, cosmological simulations lead to the generation of contrast models, which allow comparison between simulated data with those achieved by the traditional way. Since there is not a single validation protocol, practices are heterogeneous. One of the strategies has to do with validating simulations initially through observational data, another one achieves validation according parametrization with new data available. Since observational data and simulated data can be compared to each other, they share eventually the same epistemic level or status. Consequently, observations via simulations are feasible. From the contrast models achieved, it is possible to conclude by saying that the use of horizontal validation techniques among simulations is viable, in particular, between the standard cosmological model and alternative models.

Keywords: Scientific practices; validation; observation; simulation models; cosmology

Introducción

Dada la relevancia de la computación en los laboratorios astronómicos actuales, se destaca como uno de sus frentes más importantes aquél que involucra a las simulaciones computacionales en el ámbito observacional de la cosmología contemporánea. Los modelos de simulación están estrechamente vinculados a los resultados obtenidos de forma observacional, logrando así su validación de diferentes maneras. Así, las simulaciones cosmológicas hacen posible la generación de modelos de contraste, los cuales permiten la comparación entre los datos simulados con aquéllos alcanzados por la vía tradicional (Bozzoli y Paz, 2010, 2011). Además, estos modelos son capaces de reproducir los procesos físicos que subyacen en cada instancia del modelo de observación considerado, tales como: errores metodológicos, efectos de proyección, ruidos instrumentales, etc.

En la literatura filosófica vigente, la evaluación de los modelos de simulación ha sido planteada por diferentes autores que sostienen

que tal valoración consiste en algo más que comparar los datos simulados con los datos observacionales/experimentales (Humphreys, 2013). De esta manera, con la escasa información sobre cómo este contraste puede llevarse a cabo, lo que ciertamente importa es concebir la capacidad del modelo computacional a la hora de proveer evidencia a favor de alguna hipótesis específica dada (Parker, 2008). Con este fin, la evaluación es caracterizada, en contextos ingenieriles y científicos, en términos de verificación y de validación. El primer caso consiste en saber si el proceso que determina el resultado de una simulación se aproxima a las soluciones arrojadas por las ecuaciones diferenciales, presentes en el modelo del fenómeno físico. Pese a que este método es inadecuado en aquellos casos donde las soluciones analíticas no estén disponibles, se recurre a otras técnicas indirectas a fin de establecer una comparación más confiable. A los propósitos de este trabajo, se dejará de lado esta clase de prácticas. Una de las estrategias del segundo caso consiste en cotejar los datos simulados con los datos observacionales, aun cuando estos últimos sean escasos. Esto debilita el contraste, logrando que este método empleado sea demasiado débil para establecer la evaluación de las simulaciones (Winsberg, 2010). La credibilidad de estas últimas está basada en los modelos físicos, en las observaciones y en la interacción entre ambos.

Al no haber un protocolo para validar tales simulaciones, surgen distintas formas de establecer vínculos entre el modelo del fenómeno físico bajo investigación y los datos empíricos adquiridos, dando lugar a posibles reinterpretaciones de las observaciones. En particular, en la cosmología, el modelo estándar (Λ CDM) postula que la distribución de la materia en el universo es lo suficientemente regular como para asumir que el mismo es homogéneo e isótropo. Además, las observaciones actuales de cierto tipo de supernovas (Ia) revelan que el universo se expande de forma acelerada. Ello conduce

a reintroducir la constante cosmológica en este modelo para dar cuenta de tal aceleración, postulando como causa de la misma una entidad exótica denominada “energía oscura”. Estudios recientes cuestionan la existencia de dicha entidad, sugiriendo una explicación alternativa, fuera de lo convencional, a través de una reinterpretación estadística de las bases de datos disponibles. Sin alterar la física del modelo canónico y teniendo en cuenta la estructura observable del universo a gran escala, estos astrónomos proponen un modelo del mismo con una “expansión diferencial”. Al realizar el modelo computacional, las simulaciones reproducen tales estructuras observadas, revelando cómo éstas alteran la expansión (Rácz et al, 2017). Atendiendo a este estudio de caso, y pese a las diferencias notorias entre los procesos observacionales y aquéllos computacionales, se intentará mostrar que las simulaciones, al alcanzar un nivel de validación sustentable, arrojan resultados que adquieren el mismo estatus evidencial que los obtenidos observacionalmente. De esta manera, es posible sostener que los modelos de simulación son herramientas indispensables de la cosmología actual y deben ser considerados instrumentos alternativos de la observación.

Aunque las prácticas de validación son heterogéneas, las mismas pueden ser identificadas, a grandes rasgos, siguiendo dos enfoques verticales. Uno pretende validar inicialmente los modelos computacionales con bases de datos observacionales disponibles (*top-down*). El otro intenta realizar la validación a través del ajuste de parámetros conforme a los resultados obtenidos mediante las observaciones, transfiriendo así el contenido empírico a simulaciones más sofisticadas (*bottom-up*) (Guillemot, 2010). Debido a que los datos obtenidos de las observaciones y de las simulaciones son comparables entre sí, ellos poseen eventualmente el mismo nivel o estatus epistémico. Este último aspecto permite que sean viables observaciones a través de simulaciones. A partir de los

modelos de contraste logrados, se concluirá que es factible el empleo de técnicas horizontales de validación (*from side to side*) entre simulaciones, en particular, entre el modelo cosmológico estándar (Λ CDM) y modelos alternativos (A ν ERA, por ejemplo).

Conexiones entre la observación y la simulación

Guillemot (2010) sostiene que, en la actualidad, son escasos los abordajes filosóficos sobre la validación de modelos a través de la comparación con las bases de datos observacionales, las cuales proveen el soporte evidencial que otorga confiabilidad a las simulaciones computacionales. Así, la credibilidad de estas últimas es lograda a través del contraste con las mediciones obtenidas por la vía tradicional. En este sentido, al explorar y analizar las interrelaciones entre diferentes capas de datos y los modelos de simulación, esta autora intenta rescatar el rol crucial de las prácticas de observación en la evaluación y la parametrización de dichos modelos.

Desde la perspectiva de la “concepción semántica” de las teorías, los modelos son principalmente representaciones que dan significado a los formalismos matemáticos presentados por aquéllas. Sin embargo, en las últimas décadas, se ha repensado la noción de modelo, aludiendo a la supremacía de ellos con respecto a la capacidad representacional de las teorías (Cartwright, 1999). En esta dirección, se ha caracterizado a los modelos como agentes autónomos, los cuales son relativamente independientes tanto de la teoría como del mundo físico (Morrison y Morgan, 1999). Esta autonomía permite que los modelos sean considerados como instrumentos de exploración en ambos dominios. Además, ellos poseen la capacidad de mediar activamente entre la teoría y los datos observacionales, lo cual permite que el modelado de fenómenos complejos no pueda ser reducido a meros cálculos de aquellas teorías

subyacentes. Aun cuando estas últimas den cuenta de los procesos físicos involucrados, los modelos de simulación incluyen cadenas inferenciales sofisticadas que transforman las estructuras teóricas en conocimiento concreto del fenómeno (Winsberg, 1999). Dado que los modelos y las bases de datos están interrelacionados, algunos autores sostienen que los primeros están “cargados” de datos, mientras que éstos últimos están sesgados por tales modelos. Dicha relación de interdependencia no es circular sino simbiótica, es decir, cada lado obtiene ventaja uno del otro (Edwards, 1999). Desde esta perspectiva, los modelos computacionales son tan confiables como aquellos tradicionales, ya que alcanzan cierto grado de credibilidad a través de sus vínculos con las observaciones y los experimentos. Las credenciales epistémicas de las simulaciones son logradas en función de las teorías y de los experimentos, como así también de los métodos de modelado más aceptados por la comunidad científica. Al igual que en las prácticas más ortodoxas, el desarrollo instrumental condiciona las técnicas asociadas, permitiendo algún tipo de estabilidad interna y auto-vindicación de las mismas a lo largo del tiempo.

Desde el surgimiento de los primeros modelos numéricos hasta la actualidad, la computación ha permitido la comprensión de una variedad de fenómenos en diferentes campos de las ciencias naturales. A través de estos modelos, se generan nuevos conocimientos que describen las interacciones entre los objetos y sus propiedades dentro de un sistema físico determinado. Bajo condiciones límite específicas, dichos modelos reproducen algunas características de los procesos involucrados y el comportamiento de tal sistema. De esta manera, el modelado computacional posibilita la exploración de fenómenos físicos logrados virtualmente. En este sentido, este tipo de experimentación guarda similitud con aquella llevada a cabo en los laboratorios. Por un lado, dada su capacidad representacional, es posible manipular los parámetros físicos y

chequear las hipótesis teóricas involucradas. Por el otro, los resultados arrojados por estos modelos generan bases de datos simulados, los cuales deben ser interpretados y medidos. Sin embargo, para Guillemot, hay una clara distinción entre los experimentos tradicionales y los computacionales. Estos últimos están basados en símbolos y dígitos y no poseen una confrontación directa con el mundo. No obstante, en ambos dominios está presente la selección y el ajuste de parámetros físicos. Así, la parametrización, además de asignar valores a las magnitudes implicadas, permite articular los cálculos provistos por las teorías con las mediciones obtenidas por las observaciones.

Aunque los modelos experimentales de laboratorio parecen alcanzar un significado más amplio que aquéllos numéricos, las simulaciones muestran, por el contrario, una imagen bastante nítida de la confluencia de diferentes técnicas. Por ejemplo, esta autora menciona que para poder chequear una hipótesis dada es necesario traducirla, mediante métodos numéricos específicos, en forma de un algoritmo que es insertado en el modelo computacional para luego ejecutarlo en una computadora. El modelo de simulación resultante, aunque se halla limitado a un ámbito virtual, se nutre de aspectos tanto teóricos como experimentales. Ella sostiene que la experimentación numérica es, por sí sola, insuficiente y que sólo alcanza su estatus como práctica de modelado cuando incorpora, de una u otra manera, datos observacionales que impregnen empíricamente al modelo y permitan la confrontación indirecta del mismo con el mundo físico. Aunque el rol de la computación es crucial en el modelado de fenómenos meteorológicos, astronómicos o físicos, otros ingredientes son necesarios para que estas prácticas sean eficientes. En particular, el avance tecnológico de los instrumentos de observación, desde equipos en tierra hasta satélites artificiales puestos en órbita, y de las técnicas desarrolladas para su empleo proporcionan la información necesaria para el modelado de

dichos fenómenos. No obstante, estas herramientas de la observación utilizan, eventualmente, otros auxiliares como recursos computacionales para la adquisición, reducción y análisis estadístico de datos. Algunos de ellos son usados en función del automatismo propio de los sistemas instrumentales actuales, otros son programas expertos necesarios para la identificación y clasificación de objetos, por ejemplo. De esta manera, la asimilación de datos en modelos es posible gracias a la sinergia entre las prácticas teóricas, observacionales e instrumentales. Como se notará más adelante, la modelización en la astronomía genera, dentro de la comunidad de los astrónomos observacionales, distintas sensibilidades hacia los aparatos tradicionales, o bien, hacia las computadoras. En este trabajo se sostendrá que, a través de estas últimas, como parte esencial de los sistemas multi-instrumentales más recientes, es posible llevar a cabo observaciones de fenómenos que involucran procesos astrofísicos sofisticados.

Guillemot cuestiona qué tipos de datos se confrontan con los resultados de las simulaciones. Más allá del estudio de caso que ella considera, se plantea que tales datos observacionales son altamente reconstruidos; por ello, existe la necesidad de considerar los diferentes mecanismos de producción de datos y sus respectivos modelos de datos asociados. La astronomía, al igual que otras ciencias naturales como la paleontología, es una disciplina histórica. Ello permite articular los registros observacionales del pasado con bases de datos actuales, completando la información faltante mediante el uso de modelos computacionales. A diferencia de la meteorología y de la climatología, la dinámica de la mayoría de los fenómenos astronómicos no puede alcanzarse en tiempos humanos, salvo objetos transitorios como aquéllos que acontecen en el sistema solar o ciertos tipos de estrellas variables o supernovas, entre otros. Con la asistencia de modelos de simulación, puede obtenerse una imagen de la evolución del universo como un todo y de las partes

que lo constituyen. Asimismo, la computación permite cerrar las grietas entre módulos de datos interconectados, ya sean observacionales o simulados, y estandarizarlos en entornos como el de los observatorios virtuales para su uso posterior en la exploración y minería de datos (Bozzoli y Paz, 2016).

Datos observacionales y datos simulados

Humphreys (2013) sostiene que los instrumentos producen imágenes que representan propiedades físicas particulares de un objeto observado. Estas propiedades causan ciertos efectos físicos en el sistema instrumental, permitiendo, luego de su detección, un registro permanente de ellas. Ante la variedad de procesos causales, inherentes a mecanismos de producción de datos eventualmente diferentes, los atributos observables se presentan en dicho sistema para ser, posteriormente, representados en una imagen epistémicamente accesible. Más allá de la distinción entre datos crudos y datos procesados, precisamente, entre datos instrumentales y datos observacionales, este autor afirma que para interpretar una imagen dada es necesario conocer no sólo lo que ella representa, sino saber cómo ha sido producida. Por otra parte, él asevera que son las propiedades, detectadas por los aparatos, las que son observadas y no los objetos en sí. De esto último se sigue que un objeto es observado sólo a través de sus propiedades o atributos físicos. Así, la clase de objeto que está siendo observado puede depender de qué propiedad está siendo detectada.

Humphreys propone, de esta manera, un realismo cuyas entidades se hallan constituidas por grupos de propiedades relacionadas y correlacionadas entre sí. En esta dirección, el descubrimiento de los procesos causales subyacentes a los objetos observados consiste en emplear instrumentos específicos que detecten uno o más atributos, usando las técnicas y auxiliares observacionales disponibles. Lo

principal, en este contexto, es alcanzar el entendimiento sobre el hecho o la situación de lo que, ocasionalmente, es la causa del fenómeno observado. A medida que se adquieren más conocimientos al respecto se descubren, gracias a los adelantos tecnológicos, nuevas propiedades y relaciones entre ellas que han permanecido ocultas hasta ese momento. Lo que Humphreys está mencionando aquí, consiste en definir las capas de cualidades o de atributos inmersos en el grupo de propiedades observadas a partir de detectores muy variados. En este sentido, los diversos vínculos que pueden guardar dentro de este cúmulo dependerá en última instancia de los tipos de mediciones logradas; esto es, diferentes estándares de medición dejarían abierta la posibilidad de medir una propiedad, pero de distintas maneras.

La razón por la cual los instrumentos son detectores de propiedades se debe a que los mismos están diseñados para ser capaces de repetir las mediciones de fenómenos físicos dados en lugares y momentos específicos. Según Humphreys, los aparatos detectan los atributos observables en sí, pero no sus instancias espacio-temporales. En otras palabras, él considera que el proceso de detección de una propiedad está desvinculado de su ubicación física. Sin embargo, dichas propiedades inician el proceso causal que va desde el fenómeno particular observado, a través del sistema instrumental que codifica la información, hasta la producción de una imagen que es accesible al sensorio humano. Las transformaciones que acontecen dentro de tal sistema son detalladas por la teoría inherente a esos procesos causales, la cual describe la entrada y la salida de los aparatos y de los auxiliares asociados. Así, la producción de datos ruidosos es controlada tanto en la fase de adquisición como de procesamiento, o sea, tanto en la reducción como en la interpretación de los mismos. Más allá de esto último, este autor sugiere que el uso de los aparatos no sólo provee evidencia de lo que una entidad es, la cual da origen a lo que se observa, sino

que el instrumento además brinda una representación aproximada del fenómeno en cuestión. Esta confiabilidad es alcanzada mediante las teorías que describen cómo opera el instrumento, a fin de descartar cualquier salida errónea en la generación de datos. Por lo tanto, al tener una comprensión general de la funcionalidad del sistema instrumental, se obtiene el control de ciertas partes dentro del proceso observacional, el cual es dominado por un marco teórico determinado.

Las imágenes crudas o directas no son las que proveen la información más relevante de lo observado, sino aquella representación visual que ha sido manipulada o procesada de alguna u otra manera. Al emplear técnicas de visualización científica, las composiciones de imágenes producidas por diferentes detectores proveen información adicional sobre los atributos físicos representados. Así, los cambios de representaciones visuales conducen, eventualmente, a la resolución de un problema en un contexto de búsqueda de nuevas cualidades observacionales (Bozzoli y Stasyszyn, 2020). De esta forma, el soporte evidencial está garantizado por el conocimiento adquirido en las prácticas observacionales. En este sentido, considerando la sofisticación de los procesos involucrados, la dependencia teórica de la observación es una virtud, más que un defecto.

Por otra parte, Humphreys enuncia un “principio de localización de la propiedad”, el cual afirma que: cada instancia de una propiedad causal posee toda la fuerza causal de esa propiedad (Humphreys, 2004). De esto se sigue que, al comprometerse ontológicamente con tipos de relaciones causales diferentes, no son los objetos sino sus propiedades los que causan los efectos que pueden ser observados. Así, en la clase de causalidad incluida en los procesos físicos de los sistemas instrumentales convencionales, como también en aquella de los sistemas computacionales, por ejemplo, las propiedades pueden ser observables por una u otra vía, respectivamente. En

consecuencia, no son las instancias espacio-temporales las que causan tales observables, sino las propiedades o atributos en sí. Incluso, tales efectos pueden ser producidos por un grupo de propiedades combinadas y no sólo por una cualidad aislada. Cabe destacar aquí que lo epistemológicamente relevante es considerar, por un lado, la reproductibilidad de los resultados, hecho que se apoya en que un efecto detectado puede darse en más de una ubicación posible; por el otro, la universalidad de las leyes físicas, donde ninguna referencia concreta es en principio establecida ya que restringe el alcance de las mismas. La mayoría de estas leyes son las que describen tanto los vínculos causales, como las correlaciones entre propiedades de fenómenos observados.

En otras palabras, la detección de propiedades físicas muy variadas, a través de plataformas multi-instrumentales, permiten la adquisición de datos a partir de una diversidad de mecanismos de producción. Estos últimos, como se hizo notar anteriormente, posibilitan la obtención de la información observacional del objeto de estudio. A los fines aquí presentes, esta perspectiva permite examinar el estatus de los datos logrados mediante las observaciones, como aquellos obtenidos por vía de las simulaciones computacionales. En esta dirección, al ignorar los orígenes de cómo se generaron los datos, es posible su reemplazo e intercambio. Siguiendo a Humphreys, estos datos pueden ser clasificados como datos empíricos, es decir, aquellos que tienen un origen concreto y son producidos por las interacciones físicas con los dispositivos de medición, y datos sobre (*about*) que contienen información acerca del modelo del fenómeno bajo investigación. Aunque los *datos(a)* pueden proveer información sobre las fuentes causales que dan origen a los *datos(e)*, no hay una clara referencia a ellos. Este autor afirma que los orígenes de los datos, sean o no materiales, son insuficientes para definir el contenido de los *datos(a)*. De esta manera, él propone extender la categoría de los datos empíricos a

datos sobre el origen e incluir aquellos provenientes de fuentes computacionales. Así, él plantea dos clases de aparatos. Por un lado, los instrumentos causales no computacionales reciben un proceso físico, como señal de entrada, el cual interactúa de manera tal que provee otro igual, como señal de salida. Por otro lado, los instrumentos causales computacionales operan de forma similar, salvo que, en algún punto de la interacción, la señal física se transforma en otra digital antes de producir la señal de salida. Es importante destacar que estos últimos aparatos involucran aspectos causales no sólo por la naturaleza de sus *inputs*, sino por las implementaciones computacionales llevadas a cabo durante el proceso.

Humphreys sitúa a dichos instrumentos entre aquellos puramente causales y las simulaciones. Esto se debe a que, en el mismo proceso computacional, se emplean inferencias inversas que permiten cerrar la “ida y vuelta” entre el detector y la fuente de los datos. Dado que la dirección de la causalidad se invierte, o sea, del *output* al *input*, esto no quebranta los procesos causales de tales instrumentos a la hora de obtener propiedades y asignar atributos observables. Así, el conocimiento que se obtiene de los procesos físicos y de los computacionales, involucrados en la producción de los datos, es útil tanto para su adquisición y reducción como para su procesamiento e interpretación. Los ruidos que provienen de los datos instrumentales, como también los errores que surgen de los datos computacionales, pueden ser eliminados a partir de métodos físicos o numéricos, discriminando así información relevante de irrelevante. Humphreys sostiene que el contenido informacional de los *datos(a)* puede referirse tanto al mecanismo de producción que los genera, como a las interpretaciones que se hagan de ellos en base al modelo del fenómeno que se está observando. Según él, este análisis puede ser replanteado en el ámbito de las simulaciones. De esta manera, el contenido de los *datos(a)* se referirá a su origen, es decir, al modelo

en el cual se basa la simulación; o bien, a la interpretación que se haga a luz del modelo del fenómeno simulado. Esta propuesta permite ponderar entre modelos de datos diferentes y comparar resultados observacionales con simulacionales, posibilitando observaciones a través de simulaciones y su eventual validación entre ellas.

Tipos de validación de modelos de simulación

Guillemot sostiene que la evaluación de los modelos meteorológicos es, al menos en principio, más simple y directa que en los modelos climáticos. De forma similar a estos últimos, la valoración de los modelos astrofísicos posee un alto contenido estadístico. En particular, las simulaciones cosmológicas están condicionadas, en parte, por valores de parámetros físicos que están ligados a bases de datos observacionales, tal como lo es la medición de la constante de Hubble para distintos estados evolutivos del universo. Dada la interacción de los diferentes procesos astrofísicos involucrados en estos modelos, se valida la representación de un fenómeno en particular de manera más o menos confiable. Ello depende del poder de síntesis de una simulación computacional en cuanto a su capacidad de generar fenómenos dentro del modelo, los cuales son predichos teóricamente. Este aspecto permite validar tanto el modelo, como las teorías implicadas. No obstante, debido a que las simulaciones son cada vez más sofisticadas, su validación, a través de las observaciones, puede resultar de la combinación de una hipótesis errónea y de una representación imprecisa del modelo. De esta manera, se logran resultados aceptables a partir de lo que los modeladores llaman “errores de compensación”. Según esta autora, una simulación puede resultar correcta, pero por una o varias razones equivocadas. En esta clase de modelos interviene una gran cantidad de mecanismos físicos y computacionales que van desde el diseño,

la construcción y la configuración de un sistema de computadoras, aisladas o unidas en un arreglo tipo clúster, hasta la arquitectura de los programas que corren en ellas. Esto posibilita un alto desempeño, logrando simulaciones de gran resolución, aunque de difícil validación. En este sentido, dada la complejidad de los fenómenos considerados, los investigadores tratan de determinar qué parámetros influyen sobre qué resultados y cómo lo hacen. Pese a que estas simulaciones son altamente susceptibles a las condiciones iniciales, el mismo modelo es también objeto de estudio.

Una característica interesante de las simulaciones cosmológicas es que no suelen ser evaluadas en términos generales, es decir, sólo a la luz del modelo estándar, canónico o concordante. Sino en cambio, lo que se pretende validar es la capacidad de las mismas a la hora de explicar diferentes propiedades de objetos y procesos astrofísicos específicos. Así, las evaluaciones son llevadas a cabo en sus respectivas dimensiones espaciales y temporales en cada nivel del modelo, o sea, pueden referirse a aspectos de la estructura del universo a gran escala, como así también a la forma de los halos que envuelven las galaxias que lo conforman. Según Guillemot, cada tipo de validación dependerá en última instancia del propósito con que es usado el modelo. Sin embargo, ella afirma que no hay un protocolo sistemático en la evaluación de los mismos, sólo basta con imaginar un procedimiento adecuado para confrontarlos con los datos disponibles. Como se mencionó anteriormente, esta autora identifica dos clases de validación: *top-down* y *bottom-up*. La primera consiste en comparar las simulaciones con bases de datos observacionales. Al ser inicialmente validados, estos modelos computacionales son capaces de reproducir las mismas propiedades físicas medidas con los instrumentos tradicionales. La segunda estrategia es empleada para seleccionar y ajustar parámetros en contraste con las observaciones disponibles. La cuestión central aquí es que los modeladores deben identificar las variables pertinentes al

fenómeno bajo investigación. De esta manera, la selección permite no sólo analizar los datos observacionales, sino también los simulados. Guillemot sostiene que la parametrización constituye un método de evaluación que permite la comparación entre modelos construidos a partir de los mismos criterios. Los investigadores restringen el espacio de parametrización de los experimentos numéricos a fin de abordar sólo aquellos comparables con la observación. Un aspecto importante de la evaluación *bottom-up* es que permite manipular datos observacionales y datos simulados, de tal forma que pueda reconstruirse y completarse la historia de los procesos físicos bajo estudio con información relevante. De esta forma, se hacen evidentes correlaciones que habían permanecido ocultas anteriormente. Como se notará a continuación, estas prácticas de validación reflejan diferencias sutiles tanto en el valor de las constantes medidas y de las observaciones de base, como en los criterios que subyacen en los modelos estándares y alternativos de la cosmología actual.

Validación de modelos cosmológicos

El modelo cosmológico estándar (Lambda CDM, por sus componentes más abundantes) ha sido desarrollado en base a la solución de Friedmann-Robertson-Walker que asume, a gran escala, homogeneidad e isotropía espacial. Las simulaciones cosmológicas tradicionales utilizan, para calcular la evolución de la expansión del universo, el valor promedio de su densidad de materia global, conforme a la ecuación de Friedmann. Sin embargo, la presencia y el crecimiento de estructuras, tales como cúmulos de galaxias, filamentos y vacíos cósmicos observados, violan manifiestamente la homogeneidad asumida. Es algo bien conocido e intensamente debatido desde hace tiempo, dada la naturaleza no lineal de las ecuaciones de Einstein, que estas inhomogeneidades locales influyen

sobre la tasa de expansión (Green and Wald, 2016; Buchert et al. 2015; Wiltshire, 2011). No obstante, considerando el éxito predictivo y el poder explicativo del modelo homogéneo Λ CDM se acepta, tácitamente, que los efectos de las inhomogeneidades observadas son débiles y por ende despreciables. La gran aceptación de este modelo canónico se debe a su concordancia con numerosas observaciones cosmológicas tales como: funciones de correlación y espectro de potencias de las estructuras observadas, abundancias de las mismas y su desarrollo, incluyendo los lineamientos generales de la evolución de las galaxias y sus propiedades, entre otras.

El problema surge al intentar realizar un modelo numérico consistente con las ecuaciones de la relatividad de Einstein, ya que el espacio-tiempo debe reaccionar a la presencia de las estructuras mencionadas que se forman en el transcurso de la misma simulación. Esto provoca que el mismo espacio-tiempo se torne intratable e incluso que el proceso de promediado se vuelva no trivial (Boero & Moreschi, 2017). No obstante, existen numerosos intentos de efectuar dichos cálculos, los cuales dependen, bajo ciertos criterios, de la introducción de escalas donde se realizan los promedios espacialmente. En particular, investigaciones recientes presentan un método alternativo que emplea las técnicas más aceptadas de las simulaciones de N cuerpos (Rácz et al, 2017). Estas prácticas, bien conocidas, permiten computar las tasas de expansión del universo local en función de promedios esféricos, redimensionando luego las fuerzas y velocidades allí presentes. Así, el modelo de simulación alternativo (AvERA) reproduce los resultados alcanzados por aquellas simulaciones que consideran un modelo cosmológico estándar, con condiciones iniciales similares, pero sin asumir un valor uniforme de la densidad de materia y, por consiguiente, de la constante de expansión. En contraposición con las simulaciones convencionales, las cuales descansan en aproximaciones que ignoran la influencia de la estructura del universo en su expansión, este

modelo se logra sin la presencia de una constante cosmológica.

A diferencia del estándar, el modelo alternativo toma en cuenta aspectos estructurales, simulando variadas regiones del universo que se expanden a distintas tasas. La expansión diferencial es originada por la formación de estructuras complejas de materia; mientras que en los modelos tradicionales la expansión acelerada es causada por la presencia de la, metafóricamente llamada, “energía oscura”. Debido a la similitud histórica en la expansión de tales modelos, es imposible distinguirlos mediante simples pruebas cosmológicas geométricas como el tamaño, la abundancia o la luminosidad de los objetos involucrados.

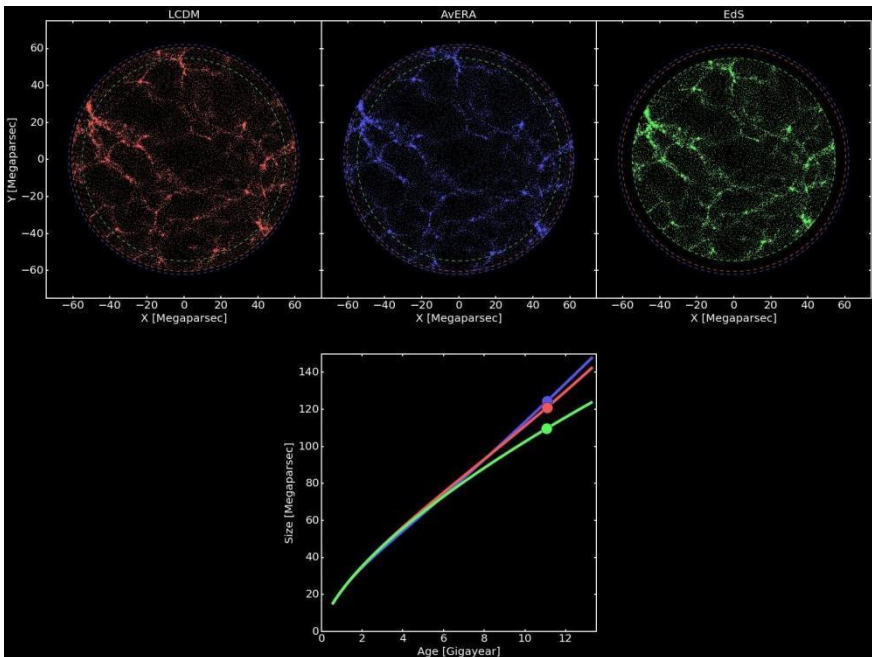


FIGURA 1. EL MODELO Λ CDM (EN ROJO) Y EL MODELO ALTERNATIVO -CON- (EN AZUL) y -SIN- (EN VERDE) EL EFECTO DE LAS INHOMOGENEIDADES INTRODUCIDAS. Créditos: István Csabai et al.

La interpretación estándar de las observaciones actuales de las supernovas tipo Ia es que el universo se expande de forma acelerada. Sin embargo, las mismas observaciones pueden ser explicadas por el modelo alternativo, carente de esta energía exótica. En otras palabras, las mismas observaciones validan tanto los resultados de las simulaciones basadas en un modelo tradicional, como así también los datos simulados obtenidos del modelo alterno.

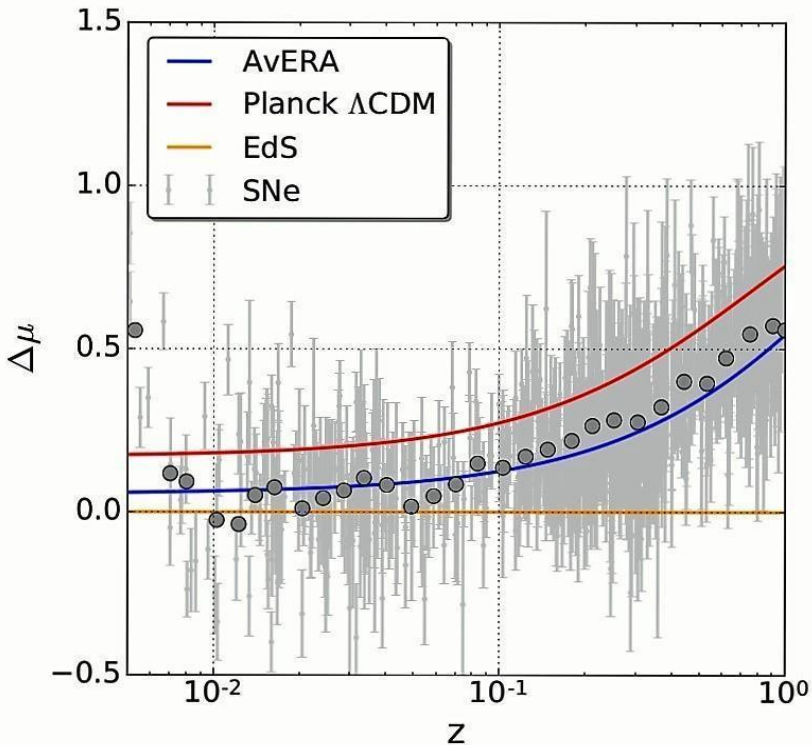


FIGURA 2. CONTRASTE ENTRE LAS OBSERVACIONES DE SUPERNOVAS (IA) Y LAS CURVAS CORRESPONDIENTES AL MODELO ESTÁNDAR (ROJO), AL MODELO ALTERNATIVO (AZUL) Y A UN UNIVERSO PLANO (NARANJA). Créditos: Rác et al, 2017.

Cabe destacar que, más allá de las diferencias conceptuales, un universo del tipo Einstein – de Sitter, a diferencia del modelo Λ CDM, acepta dentro de sus condiciones iniciales un valor de la constante de Hubble local (H_0) más bajo del observado. No obstante, este modelo es más acorde al valor del parámetro de Hubble (H) obtenido a través de las observaciones de la radiación de fondo de microondas (CMB), más precisamente, de las fluctuaciones de temperatura del universo primitivo. Ambos modelos son radicalmente diferentes. En el alternativo, se prescinde absolutamente de la energía oscura como una componente dominante, la cual sí lo es en el modelo estándar. Los dos modelos de universo presentan finales muy diferentes: el tradicional muestra una expansión acelerada que termina aislando los sistemas colapsados entre sí, mientras que el alternativo exhibe una expansión desacelerada que termina en un universo estático en tiempo infinito.

Como se mencionó antes, los resultados arrojados por ambas simulaciones son semejantes en términos de escalas en función del tiempo. Aun así, el análisis de los datos simulados requiere, en cada caso, de interpretaciones estadísticas distintas. Ello se debe a la peculiaridad de los supuestos cosmológicos subyacentes en cada modelo. Por un lado, los resultados del modelo estándar han sido extensivamente contrastados con toda la evidencia observacional disponible. Por el otro, diversos autores (Domínguez & Ruiz, 2012) han llegado a conclusiones similares a las presentadas en la reciente investigación sobre un modelo cosmológico alternativo (Rácz et al, 2017). Aunque posee cierto atractivo heurístico, la implementación de este último modelo requiere el desarrollo de nuevas técnicas computacionales. Con ello y a fin de no imponer simplificaciones como la homogeneidad espacial, las ecuaciones de Einstein podrían resolverse de modo consistente, en un contexto cosmológico. Quizás, de este modo, los misterios sobre la composición del “sector oscuro” del universo sean resueltos.

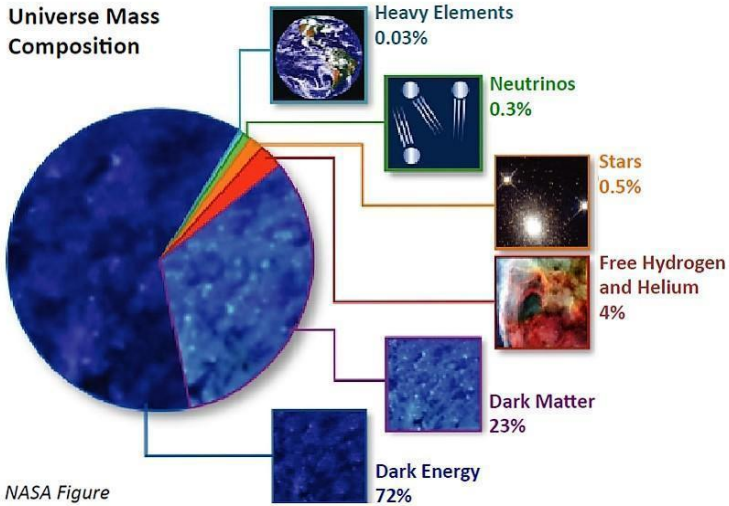


FIGURA 3. PORCENTAJES DE LAS COMPONENTES VISIBLES Y OSCURAS DEL UNIVERSO. Créditos: NASA.

Conclusión

Las observaciones juegan un rol crucial en los diversos enfoques y prácticas de validación de simulaciones cosmológicas. Aunque no exista un protocolo para evaluar dichos modelos, no cabe ninguna duda de la importancia de establecer vínculos con las bases de datos disponibles. Pueden emplearse diferentes estrategias, ya sea impregnando inicialmente estos modelos con observaciones y/o seleccionando y ajustando los parámetros conforme a los requerimientos epistémicos de cada modelo de universo. En esta dirección, resulta imprescindible transferir, de forma más o menos directa, contenido empírico al momento de realizar un contraste

efectivo entre los resultados obtenidos por tales simulaciones y aquéllos alcanzados por la vía tradicional.

Guillemot menciona los errores de compensación y sostiene que una simulación puede ser correcta, pero por una o varias razones equivocadas. Ello significa que una hipótesis errónea, asociada a una representación imprecisa del modelo, genera datos concordantes con las observaciones. En consecuencia, es factible que modelos distintos conlleven a resultados simulados semejantes, los cuales son validados al compararlos con los datos observacionales. Más allá de que estos últimos puedan ser interpretados bajo los supuestos equivocados del modelo, lo que conduciría al bien conocido problema de la vieja evidencia (Glymour, 1980; Mayo, 1996), son extensamente admitidos como el punto de partida de cualquier validación posible.

Siguiendo a Humphreys, bajo la suposición de que los modelos computacionales son herramientas insustituibles, las simulaciones deben ser consideradas instrumentos de observación. Esto implica que los datos simulados poseen el mismo estatus epistémico que los datos observacionales. A diferencia de la propuesta de Guillemot, la cual afirma que las parametrizaciones permiten validar verticalmente modelos globales, a partir de otros más específicos, aquí se sostiene que las validaciones de este tipo son logradas horizontalmente (lado a lado) entre simulaciones cosmológicas. En particular, contrariamente al modelo alternativo, el modelo Λ CDM es ampliamente aceptado y validado por numerosas observaciones. No obstante, la evolución mostrada por este último es comparable a las estructuras desarrolladas por el modelo AvERA. Dado que las parametrizaciones se hallan sujetas a las hipótesis de cada modelo, esta contrastación los hace indistinguibles. Ello sugiere el uso de mecanismos inferenciales abductivos e indica que la relación costo-beneficio se defina entre el éxito explicativo y predictivo y la necesidad de crear entidades extrañas.

Referencias

- Bozzoli, M., y Paz, D. (2010). El rol y el alcance de la medición en la simulación astronómica. En P. García y A. Massolo (Eds.), *Epistemología e Historia de la Ciencia, Selección de Trabajos de las XX Jornadas* (Vol. 16, pp. 110-117). Editorial de la UNC. <http://hdl.handle.net/11086/3789>
- Bozzoli, M., y Paz, D. (2011). La autonomía de los modelos en astronomía. En A. Torrano y A. P. Videira (Eds.), *Representación en Ciencia y Arte* (Vol. 8, pp. 63-71). Editorial Brujas.
- Bozzoli, M., y Paz, D. (2016). Evidencia y observabilidad en las prácticas astronómicas. En L. Samamé, L. M. Peris Viñé y F. Ferrari (Eds.), *Representación en Ciencia y Arte* (Vol. 5, pp. 355-366). Editorial Brujas.
- Bozzoli, M., y Stasyszyn, F. (2020). Cambios de representaciones visuales en cosmología observacional. En M. de las Mercedes O'Lery, Lucía Federico y Yefrin Ariza (Eds.), *Filosofía e Historia de la Ciencia en el Cono Sur: Selección de Trabajos del XI Encuentro* (Vol. 1, pp. 123-139). AFHIC. <http://www.afhic.com/wp-content/uploads/2017/11/Seleccion-AFHIC-1.pdf>
- Bozzoli, M., y Paz D. (2023). Validación de observaciones y de simulaciones astrofísicas: un enfoque epistemológico. *Revista Disertaciones*, 12(1), 43-68. <https://doi.org/10.33975/disucq.vol12n1.1138>
- Boero, E. F., y Moreschi, O. M. (2017). Gravitational lens optical scalars in terms of energy–momentum distributions in the cosmological framework. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(4), page 4683-4703. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty110>
- Buchert, T. et al. (2015). Is there proof that backreaction of inhomogeneities is irrelevant in cosmology? *Classical and Quantum Gravity*, 32(21). <https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/21/215021>

Cartwright, N. (1999). Models and the limit of theory: quantum Hamiltonians and the BCS model of superconductivity. In M. S. Morgan y M. Morrison (Eds.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 241-281). Cambridge University Press. <http://eprints.lse.ac.uk/id/eprint/10205>

Domínguez, M. J., & Ruiz, A. N. (2012). Measuring the dark matter equation of state and its cosmological consequences. *AIP Conference Proceedings*, 1471(1), 70-74. <https://doi.org/10.1063/1.4756815>

Edwards, P. (1999). Global climate science, uncertainty and politics: data-laden models, models-filtered data. *Science as Culture*, 8(4), 437-472. <https://doi.org/10.1080/09505439909526558>

Glymour, C. (1980). *Theory and Evidence (1 ed.)*. Princeton University Press.

Green, S. R., & Wald, R. M. (2016). A simple, heuristic derivation of our 'no backreaction' results. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 33 (12). <https://doi.org/10.1088/0264-9381/33/12/125027>

Guillemot, H. (2010). Connections between simulations and observation in climate computer modeling. Scientist's practices and "bottom-up epistemology" lessons. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 41 (3), page 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.07.003>

Humphreys, P. (2004). *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/0195158709.001.0001>

Humphreys, P. (2013). What are Data About? In J. Durán and E. Arnold (Eds.), *Computer Simulations and the Changing Face of Experimentation (1 ed., pp. 12-28)*. Cambridge Scholars Publishing.

Mayo, D. (1996). *Error and the Growth of Experimental Knowledge (1 ed.)*. The University of Chicago Press.

<https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/E/bo3637756.html>

- Morrison, M.; Morgan M. S. (1999). *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science (1 ed.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108>
- Parker, W. (2008). Franklin, Holmes, and the epistemology of computer simulation. *International Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 22 (2), 165-183. <https://doi.org/10.1080/02698590802496722>
- RÁCZ, G. et al. (2017). Concordance cosmology without dark energy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469, L1-L5. <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx026>
- Wiltshire, L. D. (2011). What is dust?—Physical foundations of the averaging problem in cosmology. *Classical and Quantum Gravity*, 28(16). <https://doi.org/10.1088/0264-9381/28/16/164007>
- Winsberg, E. (1999). Sanctioning Models: The Epistemology of Simulation. *Science in Context*, 12(2), 275-292. <https://doi.org/10.1017/S0269889700003422>
- Winsberg, E. (2010). *Science in the Age of Computer Simulation*. The University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226902050.001.0001>

