

Función de los formalismos en la validación de teorías científicas



Autor: Juan Alberto Molina García¹
E-mail: amdir2013@gmail.com

Resumen: Este trabajo analiza el papel de los formalismos matemáticos y lógicos en la validación de las teorías científicas. Históricamente, estos formalismos han sido herramientas esenciales para representar conceptos abstractos y relaciones entre variables, generando debates sobre su capacidad para complementar o sustituir la experimentación. El objetivo general es evaluar el rol de los formalismos en la validación científica; los objetivos específicos incluyen definir y clasificar los formalismos, explorar su relación con la experimentación, examinar sus limitaciones y analizar estudios de caso relevantes. Con una metodología cualitativa y analítica, se concluye que, aunque indispensables, los formalismos deben interpretarse dentro de marcos epistemológicos que reconozcan sus límites.

Palabras clave: epistemología, formalismos, lógica, metodología científica, validación de teorías.

Abstract: This paper analyzes the role of mathematical and logical formalisms in the validation of scientific theories. Historically, these formalisms have served as essential tools for representing abstract concepts and relationships between variables, generating debates about their capacity to complement or replace experimentation. The general objective is to evaluate the role of formalisms in scientific validation; the specific objectives include defining and classifying formalisms, exploring their relationship with experimentation, examining their limitations, and analyzing relevant case studies. Using a qualitative and analytical methodology, the study concludes that, although indispensable, formalisms must be interpreted within epistemological frameworks that acknowledge their limits.

Keywords: epistemology, formalisms, logic, scientific methodology, theory validation.

Introducción

La validación de las teorías científicas es un proceso mediante el cual se determina la validez y aplicabilidad de un marco teórico para representar fenómenos naturales y sociales. Tradicionalmente, este proceso ha estado guiado por la observación empírica y la experimentación; sin embargo, los formalismos matemáticos y lógicos han adquirido un papel fundamental al permitir la formulación precisa de teorías y la predicción rigurosa de resultados.

¹ Doctor of Philosophy (Ph. D.) in Philosophy, Tecana American University. Profesor del RCSM de Madrid (España).

Estado del arte. A lo largo de la historia de la ciencia, se pueden encontrar ejemplos del papel central de los formalismos en la estructuración y validación de las teorías. Así, desde las leyes del movimiento de Newton hasta la relatividad general de Einstein, los formalismos matemáticos han proporcionado un lenguaje riguroso en la descripción de los fenómenos observables y en la predicción de fenómenos aún no observados.

Por su parte, en la filosofía contemporánea de la ciencia, los formalismos también han sido objeto de análisis y controversias. Por ejemplo, mientras que Karl Popper subrayó la importancia de la falsabilidad empírica, Thomas Khun destacó que los formalismos son parte de los paradigmas científicos que estructuran el pensamiento en épocas de normalidad científica; el segundo, no obstante, reconoció que, en tiempos de crisis, los formalismos se pueden poner en duda y sustituirlos por otros. Mientras, Imre Lakatos argumentó que los formalismos estructuran los programas de investigación científica y, por lo tanto, guían el progreso del conocimiento.

Otro punto clave en el debate es la relación entre formalismo y experimentación. Aunque en disciplinas como la física teórica los formalismos pueden parecer suficientes para validar las teorías, la pretendida falta de validación empírica siempre deja abierta la cuestión de la conexión con la realidad observable; de ahí que se corra el riesgo de relegar a los formalismos el papel de meras construcciones abstractas, las cuales dejan de lado los aspectos más relevantes de los fenómenos estudiados y conducen a una validación sesgada de las teorías científicas. Por el contrario, en ciencias como la economía o la biología, los formalismos se emplean de modo variado, con interrogantes y críticas específicas que siembran la duda en torno a su capacidad para capturar la complejidad de los fenómenos estudiados.

Objetivo general

Analizar el rol de los formalismos en la validación de las teorías científicas y evaluar cómo contribuyen a la coherencia interna, la precisión predictiva y la aplicabilidad de dichas teorías.

Objetivos específicos

1. Identificar los tipos de formalismos más comunes en la ciencia.
2. Comparar el papel de los formalismos con el de la experimentación en la validación científica.
3. Evaluar las limitaciones de los formalismos en el proceso de validación.
4. Analizar estudios de caso en los que los formalismos han desempeñado un papel central.

Problema de investigación. El estudio busca responder cómo contribuyen los formalismos a la validación de las teorías científicas en

distintas disciplinas, en qué medida pueden considerarse sustitutos o complementos de la experimentación empírica, cuáles son sus limitaciones y cómo pueden abordarse dentro de marcos epistemológicos adecuados.

Justificación. De todo lo anterior se desprende que la comprensión del rol de los formalismos en la validación de teorías es esencial para avanzar en el conocimiento científico. En un contexto en que la ciencia se enfrenta a fenómenos complejos y abstractos, los formalismos proporcionan un lenguaje universal y certero para desarrollar y conectar teorías entre sí. Por lo tanto, la relevancia del presente estudio radica en que éste ofrece una visión crítica y detallada de cómo los formalismos influyen en la construcción del conocimiento científico, a la vez que aporta una reflexión sobre las ventajas y limitaciones de estos y plantea una comparación con otro gran procedimiento de validación científica: la experimentación.

Metodología. La investigación adopta un enfoque cualitativo centrado en el análisis conceptual y la revisión crítica de la literatura. Se emplean cuatro métodos principales: análisis documental, análisis comparativo, estudios de caso y método hermenéutico. Estos procedimientos permiten examinar cómo los formalismos matemáticos y lógicos se aplican en la práctica científica, identificar patrones de uso, comparar su función en distintas disciplinas y analizar interpretaciones relevantes dentro de marcos epistemológicos contemporáneos (Bowen, 2009; Danzin & Lincoln, 2011; Einstein, ed. 1996; Flyvbjerg, 2006; Gadamer, 1975; Ragin, 2014; Stake, 1995).

Limitaciones del estudio. Será fundamental reconocer las limitaciones inherentes al punto de vista metodológico adoptado, pues es así como se pueden contextualizar adecuadamente los resultados de la investigación (Patton, 2015).

Dichas limitaciones se refieren, en primer lugar, al alcance temporal y a la disciplina de estudio. Si el foco principal es el análisis de los formalismos a partir del siglo XX, podría limitarse la comprensión de la evolución de los formalismos en épocas anteriores; y si el análisis se centra en las ciencias naturales y sociales, podrían quedar excluidos otros campos, como las humanidades digitales, cuyos formalismos también son relevantes.

En segundo lugar, las limitaciones también se refieren a la complejidad técnica de los formalismos, que puede entorpecer la comprensión y el análisis profundo de estos. En tercer lugar, algunas fuentes de datos, especialmente las que están relacionadas con experimentos contemporáneos o con simulaciones computacionales, pueden no estar disponibles debido a las restricciones de acceso o a la complejidad técnica inherente. Por último, al utilizar métodos cualitativos y hermenéuticos, se corre el riesgo de hacer interpretaciones subjetivas que

podrían influir en la validez de los resultados. Será imprescindible tener en cuenta estos posibles sesgos durante el análisis.

Marco teórico

El marco teórico de este trabajo tiene la finalidad de proporcionar una base conceptual sólida para analizar el rol de los formalismos en la validación de teorías científicas. En esta sección, se examinan las definiciones y clasificaciones de los formalismos lógicos y matemáticos, así como sus evoluciones históricas e impactos en la ciencia moderna. Además, se analiza la teoría de la validación científica y la relación crítica entre los formalismos y la experimentación. Estos elementos son esenciales para comprender cómo los formalismos estructuran el conocimiento científico y contribuyen a la construcción de teorías robustas y coherentes.

Definición y clases de formalismos. El término *formalismo* se refiere al uso de estructuras formales, como las matemáticas y la lógica, para representar conceptos y relaciones dentro de un ámbito definido. Los formalismos permiten describir fenómenos con precisión, garantizar la coherencia interna de las teorías y facilitar la comunicación científica mediante un lenguaje común. Sus propiedades fundamentales incluyen consistencia lógica, generalidad, precisión y reproducibilidad.

Hay dos grandes clases de formalismos: los matemáticos y los lógicos. Los primeros son fundamentales en muchas áreas de la ciencia, ya que proporcionan un marco idóneo para el análisis cuantitativo y la modelización de fenómenos complejos. Estos formalismos se sirven del lenguaje de las matemáticas para describir y analizar los fenómenos naturales y sociales, prever los comportamientos de los sistemas y estructurar las teorías científicas de manera rigurosa (Tall, 2017). Algunos de ellos incluyen:

i) El *cálculo diferencial e integral*, que es primordial para el estudio del cambio y la acumulación. Se emplea para modelar fenómenos como el movimiento de objetos (física), el crecimiento de poblaciones (biología) y las tasas de cambio en los mercados financieros (economía). El cálculo diferencial e integral permite la derivación de ecuaciones diferenciales, las cuales describen cómo una cantidad varía en función del tiempo o de otra variable (Stewart, 2015).

ii) El *álgebra lineal*, que se centra en el estudio de vectores, matrices y sistemas de ecuaciones lineales. Este formalismo es imprescindible en disciplinas como la física, que se sirve de él para describir el comportamiento de los sistemas de partículas y para resolver problemas de dinámica; también lo es en informática, para el procesamiento de imágenes y el aprendizaje automático (Strang, 2016).

iii) La *teoría de grupos* estudia las simetrías y transformaciones en diversos sistemas. Es crucial en física, especialmente en mecánica cuántica, pues sirve para analizar las propiedades de las partículas subatómicas y sus interacciones (Lederman & Reeder, 2012).

iv) Las *ecuaciones diferenciales* relacionan una función con sus derivadas. Este formalismo es utilizado en la modelización de los sistemas dinámicos en física, ingeniería, biología y otras disciplinas. Por ejemplo, la ecuación de Schrödinger (mecánica cuántica) describe cómo evoluciona en el tiempo la función de onda de una partícula (Boyce & Di Prima, 2017).

Por su parte, los formalismos lógicos se basan en la lógica formal para estructurar y evaluar argumentos y teorías. Son importantes para asegurar que las teorías científicas sean internamente consistentes y para evitar paradojas y contradicciones lógicas (Smith, 2017). Entre ellos, se incluyen los sistemas de:

I. La *lógica proposicional*, que es el sistema lógico más básico. En ella se trabaja con proposiciones, que pueden ser verdaderas o falsas, y con operadores lógicos como “y”, “o” y “no”. Se utiliza en matemáticas y en informática para el diseño de circuitos digitales y para la verificación formal de softwares (Hurley, 2016).

II. La *lógica de primer orden* es una extensión de la lógica proposicional, pues incluye los cuantificadores “para todo” y “existe”, y permite razonar sobre los objetos y las relaciones entre ellos. Este formalismo es imprescindible en la matemática formal, en la inteligencia artificial y en el procesamiento del lenguaje natural (Enderton, 2001).

III. La *lógica modal* se ocupa de conceptos como la posibilidad y la necesidad. Este formalismo es útil en áreas como la teoría de la decisión, la teoría de la probabilidad y la ética, pues permite el análisis de situaciones hipotéticas y contra fácticas (Blackburn, Rijke & Venema, 2002).

Los formalismos matemáticos y lógicos proporcionan herramientas para la construcción y el análisis de teorías científicas; y también permiten establecer conexiones entre diferentes disciplinas. Al aplicar los formalismos, los científicos pueden traducir los problemas complejos en lenguajes simbólicos; y es que, mediante estos lenguajes, se pueden manejar métodos matemáticos y lógicos para la resolución de dichos problemas.

En física, por ejemplo, los formalismos como el cálculo y las ecuaciones diferenciales son indispensables para modelar el comportamiento de los sistemas físicos bajo diferentes condiciones. En biología, el álgebra lineal y las ecuaciones diferenciales permiten modelar procesos como la difusión de genes en las poblaciones o la dinámica de los sistemas complejos. En computación, los formalismos lógicos son cruciales para desarrollar algoritmos, verificar softwares y diseñar

sistemas de inteligencia artificial que puedan razonar y tomar decisiones de manera autónoma.

Historia y evolución de los formalismos en la ciencia. Los formalismos tienen raíces profundas en la historia de la ciencia. Desde los *Elementos* de Euclides, que establecieron un sistema axiomático para la geometría, hasta la lógica aristotélica como base del razonamiento deductivo, los formalismos han estructurado el conocimiento científico durante siglos. La Revolución Científica consolidó su papel mediante obras como los *Principia Mathematica* de Newton, que emplearon el cálculo para formular leyes físicas universales. En los siglos XIX y XX, avances como las ecuaciones de Maxwell, la relatividad de Einstein, la mecánica cuántica y la lógica simbólica ampliaron el alcance de los formalismos y transformaron la comprensión científica del mundo.

En suma, la historia de los formalismos en la ciencia muestra la evolución experimentada por estos desde las herramientas rudimentarias de la Antigüedad hasta los complejos sistemas matemáticos y lógicos de la ciencia moderna. En esa evolución histórica, puede verse que los formalismos han permitido a los científicos formular teorías precisas y unificadas; además, han facilitado la validación empírica de las teorías y han ampliado el alcance del conocimiento humano en áreas como la física, la biología y la computación. La evolución de los formalismos ha reflejado los avances experimentados en el conocimiento científico, a la vez que se ha constituido en el motor de dichos avances y ha procurado la resolución de problemas que antes se consideraban insuperables.

Teoría de la validación científica. La validación científica consiste en confirmar o refutar teorías mediante observación, experimentación y análisis lógico. Popper (1959) destacó la falsabilidad como criterio esencial de científicidad, mientras que Kuhn (1971) subrayó la importancia de la coherencia interna y la compatibilidad con paradigmas previos. La validación puede ser empírica, lógica o matemática, y cada tipo aporta elementos complementarios para evaluar la solidez de una teoría.

La *validación empírica* es el proceso de confirmar una teoría mediante la observación y la experimentación. Implica diseñar y realizar experimentos que pongan a prueba las predicciones de una teoría. Si los resultados experimentales coinciden con las predicciones teóricas, la teoría se considera validada. Por ejemplo, la ley de la gravitación de Newton fue validada mediante numerosas observaciones de los movimientos de los planetas y mediante experimentos efectuados en la Tierra.

La *validación lógica* consiste en asegurar que la estructura interna de una teoría es coherente y que las conclusiones derivadas se siguen lógicamente de las premisas. Esto se consigue mediante formalismos lógicos que permiten analizar el razonamiento que subyace en una teoría. En matemáticas y en disciplinas teóricas como la filosofía, esta forma de validación es fundamental.

En muchas ramas de la ciencia, especialmente en física y en economía, las teorías se formulan en términos matemáticos, y su *validación (matemática)* incluye la verificación de que los resultados son correctos y relevantes para los fenómenos que describen. Por ejemplo, las ecuaciones de la mecánica cuántica son validadas tanto por su coherencia interna como por su capacidad para predecir los resultados de los experimentos.

Los formalismos desempeñan una importante función en la validación científica, ya que proporcionan los medios necesarios para estructurar y analizar las teorías de manera rigurosa. Al traducir las ideas y los conceptos a un lenguaje formal, los científicos pueden aplicar métodos lógicos y matemáticos para verificar la consistencia y la coherencia de sus teorías (Hempel, 1965). Estos son los principales formalismos de validación de teorías científicas:

1. *Formalismos matemáticos.* En física, por ejemplo, los formalismos matemáticos conducen a predicciones cuantitativas, las cuales pueden compararse directamente con los resultados experimentales. Por ejemplo, la teoría de la relatividad general de Einstein se puede validar mediante la comparación de las predicciones matemáticas derivadas de las ecuaciones con las observaciones astronómicas.

2. *Formalismos lógicos.* En lógica y filosofía de la ciencia, los formalismos lógicos son fundamentales para analizar la validez de los argumentos y la coherencia de las teorías. Estos formalismos se aseguran de que los razonamientos efectuados dentro de una teoría sean correctos, lo que resulta esencial para considerar que dicha teoría está científicamente validada. Por ejemplo, en la teoría de conjuntos se utilizan formalismos lógicos para evitar paradojas y afianzar la consistencia del sistema.

3. *Formalismos de simulación computacional.* En las ciencias computacionales, los mecanismos formales de validación consisten en el manejo de simulaciones y modelos computacionales. Estos formalismos permiten simular fenómenos complejos que son difíciles o imposibles de experimentar directamente, como el comportamiento del clima en largas series temporales. La validación, en estos casos, depende de la idoneidad de los formalismos para reproducir fielmente los fenómenos observados en la naturaleza.

La validación científica se enfrenta a límites e interrogantes de hondo calado, como: la incompletitud de los datos, la incertidumbre de las mediciones o la posibilidad de que los formalismos empleados no capten todos y cada uno de los aspectos relevantes de los fenómenos estudiados (Lakatos, 1983).

Así, muchos procesos científicos implican un alto grado de incertidumbre, lo que puede complicar la validación de la teoría que los explica. Los formalismos probabilísticos, como los utilizados en la teoría

cuántica, tratan de manejar esta incertidumbre, pero también introducen nuevas dificultades en la validación. De hecho, la interpretación y el manejo de la probabilidad en la validación de teorías científicas sigue siendo un área de debate.

Por otro lado, los criterios para considerar que una teoría ha sido validada pueden variar según la disciplina y el contexto. En algunas áreas, una alta correlación entre teoría y observación puede ser suficiente; mientras que, en otras, como las matemáticas, se requiere de una demostración rigurosa. Esta variabilidad en los criterios de validación muestra la diversidad de perspectivas metodológicas en la ciencia.

Finalmente, aunque los formalismos son herramientas poderosas de validación, también presentan limitaciones. Un formalismo lógico o matemático puede ser adecuado para ciertos problemas, pero inadecuado para otros. Por ejemplo, los formalismos clásicos de la física no son aplicables a fenómenos cuánticos o relativistas, lo que ha llevado al desarrollo de nuevos formalismos en estos campos.

En resumen, la validación es un proceso fundamental para el avance del conocimiento, pues garantiza que las teorías científicas son fiables y que están basadas en pruebas verificables. Los formalismos lógicos y matemáticos desempeñan un rol central en este proceso, ya que suministran los medios necesarios para estructurar, analizar y validar las teorías de manera rigurosa. Sin embargo, la validación científica arrostra desafíos de calado, desde la incertidumbre de los datos hasta las barreras inherentes a los formalismos; esto pone de manifiesto la conveniencia de que la ciencia se apoye en criterios flexibles y, al mismo tiempo, críticos.

Relación entre formalismo y experimentación. El formalismo y la experimentación son dos pilares fundamentales de la ciencia, pues, aunque con distintos enfoques, trabajan conjuntamente para conformar y validar teorías científicas. Mientras que los formalismos proporcionan un marco teórico y matemático para describir y predecir fenómenos, la experimentación se encarga de someter esas descripciones y predicciones a pruebas empíricas rigurosas (Hacking, 1990).

Más concretamente, el formalismo conlleva un lenguaje estructurado, usualmente matemático o lógico, para formular teorías científicas. A través del formalismo, los científicos pueden expresar conceptos abstractos de manera precisa y derivar conclusiones y predicciones. El formalismo es crucial en disciplinas como la física, la química y la economía, en las que los sistemas complejos requieren de modelizaciones detalladas para su comprensión y análisis.

Por su parte, la experimentación es el proceso empírico mediante el cual se observan y analizan los fenómenos naturales y sociales en condiciones controladas. Los experimentos permiten a los científicos verificar la validez de una teoría, pues estos pueden comparar sus predicciones con los resultados observados en la realidad. En este sentido, la experimentación actúa como un filtro; en dicho filtro, las teorías

formales que no se alineen con la prueba empírica pueden ser rechazadas o modificadas.

La complementariedad de ambos pilares se manifiesta en la capacidad de los formalismos para guiar la experimentación y en la necesidad de que los resultados experimentales validen o refuten los formalismos. Un buen ejemplo de esta relación es la mecánica cuántica; en ésta, los formalismos matemáticos predicen comportamientos de las partículas subatómicas que luego son corroborados por los experimentos en el laboratorio.

Pero los formalismos no sólo describen la naturaleza o las sociedades, sino que también orientan el diseño y la ejecución de experimentos científicos. Al proporcionar un marco teórico que predice ciertos resultados, los formalismos hacen posible el diseño de experimentos específicos para poner a prueba las predicciones (Morrison, 1999).

Uno de los principales roles del formalismo en la ciencia es generar predicciones cuantitativas que los experimentos puedan verificar. En física, por ejemplo, las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell predijeron la existencia de ondas electromagnéticas antes de que fueran detectadas experimentalmente por Heinrich Hertz. El formalismo matemático permitió prever fenómenos que no habían sido observados con anterioridad; es decir, el formalismo matemático guio la experimentación para descubrir nuevas realidades.

En otros campos, los formalismos permiten crear modelos y simulaciones que anticipan el comportamiento de sistemas complejos. Estos modelos sirven como una forma de experimentación teórica, y hacen posible la exploración de diferentes escenarios antes de llevar a cabo experimentos físicos costosos y difíciles. En climatología, por ejemplo, la simulación basada en formalismos matemáticos es esencial para estudiar los efectos de las alteraciones climáticas.

Pero, aunque los formalismos son ineludibles para formular teorías, es la experimentación la que, finalmente, valida o refuta éstas. La ciencia avanza mediante un ciclo continuo de formulación teórica y prueba experimental, y los resultados de los experimentos retroalimentan y refinan los formalismos empleados (Popper, 1959).

De hecho, Karl Popper subrayó la importancia de la falsabilidad en la ciencia: para él, una teoría sólo puede considerarse científica si es susceptible de ser refutada mediante la experimentación. Los formalismos, por sí solos, no pueden determinar la verdad; hay que corroborarlos o refutarlos mediante datos experimentales. Por ejemplo, la teoría del éter lumínico fue descartada después de que Michelson y Morley no pudieran detectar experimentalmente su existencia; lo que, posteriormente, llevó al desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein.

Y es que la experimentación desempeña un papel fundamental en lo que se conoce como refinamiento de los formalismos. En efecto, cuando los resultados experimentales no coinciden con las predicciones formales, es necesario reconsiderar los supuestos iniciales y ajustar los formalismos a un mejor alineamiento con la realidad observada. Un caso emblemático es la mecánica cuántica; en ésta, las discrepancias entre las predicciones clásicas y los resultados experimentales en el comportamiento de las partículas subatómicas llevaron a la creación de un nuevo formalismo que incorporaba el principio de incertidumbre de Heisenberg.

A lo largo de la historia de la ciencia ha habido otros ejemplos que ilustran cómo el formalismo y la experimentación se han influenciado mutuamente, llevando a avances significativos en el entendimiento del mundo (Holton, 1996).

La teoría de la relatividad general de Einstein es un caso paradigmático. El formalismo matemático de la relatividad general predijo que, debido a la curvatura del espacio-tiempo, la luz se desviaría al pasar cerca de un objeto masivo. Esta predicción fue experimentalmente verificada por Sir Arthur Eddington en el transcurso de un eclipse solar en 1919; lo que proporcionó una validación empírica de la teoría de Einstein.

En biología molecular, por su parte, el descubrimiento del ADN muestra cómo la experimentación validó un modelo formal. El modelo de doble hélice propuesto por Watson y Crick, basado en los datos experimentales de difracción de rayos X obtenidos por Rosalind Franklin, explicó cómo se almacena la información genética y efectuó predicciones que más tarde fueron confirmadas por los experimentos en el laboratorio.

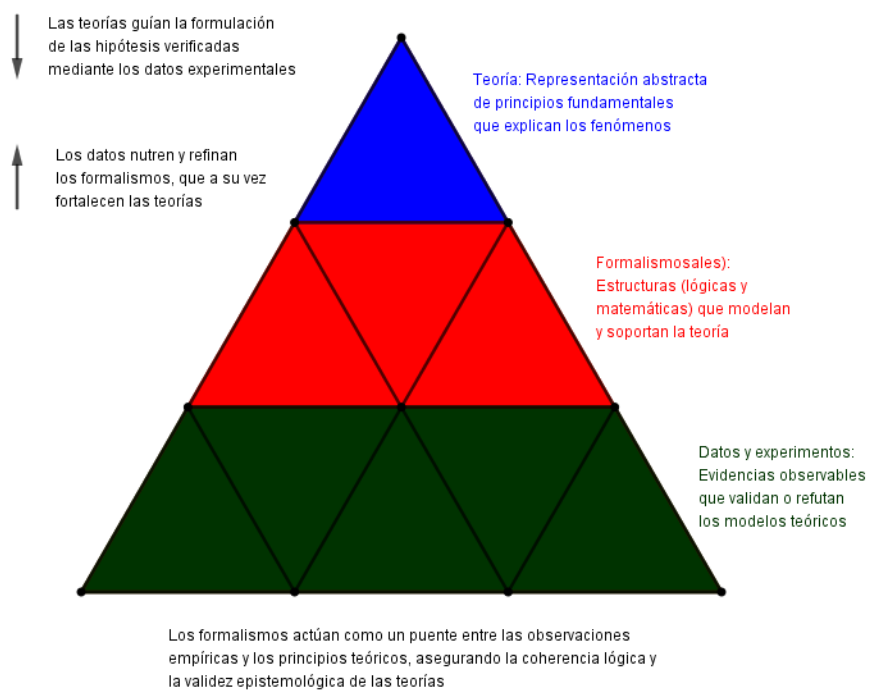


Figura 1: Jerarquía conceptual entre teorías científicas, formalismos y datos experimentales. Fuente: elaboración propia.

En la ciencia contemporánea, el vínculo entre el formalismo y la experimentación se ha vuelto aún más estrecho gracias a la simulación computacional y a los grandes experimentos colaborativos globales (Winsberg, 2011). Las simulaciones computacionales, efectivamente, son una manifestación moderna de la interacción entre el formalismo y la experimentación. Gracias a los formalismos matemáticos avanzados, es

posible modelar fenómenos imposibles de reproducir experimentalmente a causa de su magnitud y complejidad. Las simulaciones, más tarde, se comparan con los datos que sirven para validar los modelos, en un proceso que integra la predicción teórica con la prueba empírica.

En el ámbito del Big Data, la necesidad de analizar enormes cantidades de datos experimentales ha llevado a la creación de nuevos formalismos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático. Dichos formalismos poseen una doble característica: son el resultado del análisis de los datos y, a la par, son medios que sirven para guiar la experimentación futura.

Como colofón, es obligado resaltar el vínculo profundo entre formalismo y experimentación. Los formalismos proporcionan las herramientas teóricas necesarias para efectuar predicciones y diseñar experimentos, mientras que la experimentación valida o refuta estas predicciones y guía el refinamiento de las teorías científicas. A través de esta interacción dinámica, la ciencia avanza en la comprensión de la naturaleza y de las sociedades, mostrando la importancia de casar el rigor teórico con la evidencia empírica (véase la figura 1).

Análisis y discusión

Esta sección se ocupa del análisis y discusión sobre el rol de los formalismos en la validación de las teorías científicas a través de diferentes disciplinas. Partiendo de los fundamentos teóricos y metodológicos explicados en las secciones anteriores, en ésta se examina cómo se han aplicado y validado los formalismos en campos tan dispares como la física y la economía; y, también, cómo los formalismos se comparan con otras perspectivas científicas, como la experimentación. Además, se discuten las limitaciones de los formalismos y se ofrece una visión crítica y reflexiva sobre su eficacia y su aplicación en la ciencia.

Función de los formalismos en varias disciplinas científicas.

Los formalismos han desempeñado un papel crucial en el desarrollo y la validación de las teorías científicas a lo largo de la historia. En este apartado, se examinará cómo distintas disciplinas científicas han utilizado los formalismos para estructurar sus teorías, realizar predicciones y validar sus resultados. Se analizarán, específicamente, los casos de la física y la economía, disciplinas en las que los formalismos matemáticos se han revestido de fundamental importancia. Además, se indagará lo propio en otras ciencias, como la biología y las ciencias sociales, en las que los formalismos también se han constituido en valiosas herramientas metodológicas, aunque con retos particulares derivados de la complejidad de los fenómenos estudiados. Este análisis permitirá comprender la diversidad y las limitaciones de los formalismos en diferentes contextos científicos.

Así, el empleo de formalismos matemáticos ha sido prominente y esencial para el avance del conocimiento en física. Desde la formulación de la mecánica clásica de Newton hasta la relatividad general de Einstein y la mecánica cuántica, los formalismos han sido la piedra angular para estructurar y validar las teorías científicas (Greene, 2020; Penrose, 2019; Rovelli, 2018).

En la física clásica, los formalismos permitieron acuñar las leyes del movimiento de Newton y la ley de gravitación universal. Estos formalismos describieron los fenómenos observados y predijeron con éxito nuevos fenómenos.

En el siglo XX, entretanto, los formalismos avanzados, como el cálculo tensorial (de la relatividad general) y la mecánica matricial (de la mecánica cuántica) revolucionaron la física y ayudaron a describir fenómenos que no podrían ser explicados por la física clásica. Estos formalismos también facilitaron la predicción y posterior verificación de fenómenos como la dilatación del tiempo y el entrelazamiento cuántico.

Por su parte, los formalismos matemáticos han desempeñado un rol fundamental en la formulación de modelos económicos que buscan explicar y predecir comportamientos en los mercados de consumo. Los modelos económicos se basan en formalismos que abstraen la realidad económica en forma de ecuaciones que pueden ser analizadas y manipuladas para obtener predicciones (Piketty, 2020; Varian, 2021).

Así, la teoría de juegos es un ejemplo paradigmático de formalismo en economía. La teoría de juegos formaliza las interacciones estratégicas entre agentes económicos y se aplica en diversas áreas, desde la competencia empresarial hasta la negociación internacional. A través de este formalismo, se han podido predecir comportamientos económicos en situaciones de competencia y cooperación que serían difíciles de analizar de otra manera.

Por ende, los formalismos en macroeconomía, como los modelos de equilibrio general dinámico estocástico, permiten efectuar simulaciones y análisis de políticas económicas en entornos controlados, a la par que facilitan la toma de decisiones basadas en pruebas matemáticas.

Además de la física y la economía, otras disciplinas científicas han empleado formalismos para validar teorías y modelos (Granovetter, 2017; Kauffman, 2016; Romer, 2018):

a) En biología, por ejemplo, los formalismos matemáticos y computacionales son cada vez más importantes; especialmente, en biología de sistemas, donde se utilizan modelos para entender la dinámica de las redes biológicas complejas. Ejemplos de ello son la modelización de la regulación génica y la simulación de procesos evolutivos.

b) La sociología y la ciencia política han adoptado formalismos matemáticos y estadísticos para modelar los fenómenos sociales. Los

modelos de redes sociales, por ejemplo, utilizan formalismos matemáticos para analizar la estructura y la dinámica de las relaciones sociales.

c) La teoría de la computación y los algoritmos, en fin, se basan en formalismos lógicos y matemáticos. Estos formalismos son esenciales para el desarrollo de lenguajes de programación, la criptografía y la inteligencia artificial.

Comparación entre formalismos y experimentación. En este apartado se compara el rol de los formalismos con el de la experimentación en la validación de las teorías científicas, resaltando sus respectivas fortalezas y limitaciones (Cartwright, 2017; Morin, 2021).

Muchos son los casos en los que los formalismos y la experimentación son vistos como herramientas complementarias. Los formalismos proporcionan un marco teórico y predictivo, mientras que la experimentación valida o refuta las predicciones derivadas de aquéllos. Por ejemplo, la teoría cuántica fue desarrollada a partir de formalismos matemáticos, pero su aceptación generalizada dependió de los experimentos que confirmaron las predicciones.

Una de las principales críticas a los formalismos es su dependencia de supuestos que pueden no reflejar la realidad experimental. Sin la experimentación, los formalismos pueden llevar a conclusiones erróneas o no verificables. Esto se ha puesto de manifiesto en algunos desarrollos de la física teórica, como la teoría de cuerdas, en la que los formalismos son extremadamente complejos, pero carecen de pruebas experimentales directas.

Por otro lado, los formalismos procuran una abstracción que facilita el manejo de sistemas extremadamente complejos, los cuales serían imposibles de analizar experimentalmente en su totalidad. En economía, por ejemplo, los formalismos matemáticos simplifican la realidad económica en modelos manejables que pueden ser analizados para derivar políticas económicas.

Formalismos como herramientas de validación. Los formalismos estructuran las teorías científicas y también actúan como procedimientos de validación de éstas. El presente apartado se ocupa, precisamente, de la manera en que los formalismos facilitan la validación de las teorías científicas y de qué modo interpretan las diversas disciplinas dicha validación (Suppes, 2002; Winsberg, 2011).

En muchas áreas científicas, los formalismos aportan un marco coherente dentro del cual se puede formular y evaluar las teorías. De los formalismos se desprenden consecuencias lógicas y matemáticas que deben ser consistentes con los datos empíricos. Esto es particularmente evidente en la física teórica, en la que un formalismo incorrecto puede llevar a predicciones inconsistentes.

Por otra parte, en disciplinas como la economía, los formalismos matemáticos y computacionales se utilizan para simular fenómenos

complejos y para prever sus posibles evoluciones. Las simulaciones basadas en formalismos permiten adentrarse en escenarios que serían imposibles de estudiar experimentalmente; y es así como proporcionan una herramienta poderosa para validar las teorías.

Los formalismos, pues, garantizan cierto grado de rigor en el proceso científico. Sin embargo, el rigor matemático no siempre se traduce en relevancia empírica. Debido a ello, y en aras de que la validación sea efectiva y significativa, es necesario interpretar y aplicar los formalismos en su adecuado contexto.

Críticas y limitaciones de los formalismos en la ciencia. A pesar de la utilidad y relevancia de los formalismos en la ciencia, existen varias críticas y limitaciones que merecen ser consideradas. A ello se dedica este apartado (Carwright, 1999).

Una de las principales críticas a los formalismos es su aplicabilidad limitada en contextos en que las condiciones ideales asumidas por los modelos no reflejan la complejidad del mundo real. Por ejemplo, en economía, los modelos matemáticos suponen, frecuentemente, mercados perfectos y agentes racionales, lo que raramente ocurre en la práctica. Esta discrepancia entre formalismo y realidad puede llevar a predicciones inexactas o erróneas.

Otra crítica común es el reduccionismo intrínseco a muchos formalismos científicos. Al abstraer y simplificar la realidad en términos matemáticos, los formalismos pueden omitir aspectos cruciales de los fenómenos estudiados. Esto ha sido particularmente problemático en áreas como la biología o la ecología; pues, para comprender los sistemas que estudian, es necesario tener muy en cuenta la complejidad y la interacción entre las múltiples variables que se manejan.

Los formalismos, a menudo, dependen de supuestos susceptibles de ser contingentes y, en algunos casos, incluso arbitrarios. Esto plantea un verdadero problema cuando los supuestos subyacentes no son realistas o están demasiado alejados de las condiciones empíricas. En la teoría de juegos, por ejemplo, los supuestos de racionalidad completa y acceso a la información pueden no reflejar la realidad de las decisiones humanas.

Finalmente, el uso intensivo de los formalismos puede llevar a una exclusividad disciplinar, en el sentido de que los conocimientos y los métodos de un área determinada son inaccesibles para los investigadores de otras disciplinas. Lo cual, sin duda, dificulta la interdisciplinariedad y la colaboración científica, ambas esenciales para abordar los problemas complejos de la ciencia moderna.

Estudios de caso

En esta sección, se analizan algunos estudios de caso representativos en los que se han aplicado formalismos en diferentes disciplinas científicas. Mediante los ejemplos escogidos, se pretende poner de relieve las fortalezas y las limitaciones de los formalismos como procedimientos para la comprensión y modelación de los fenómenos complejos. Se analizarán casos de la física teórica, la economía matemática y la biología sistémica, y se extraerán lecciones que pueden ser útiles a fin de entender el rol de los formalismos en la ciencia en general.

Formalismos en física teórica. La física teórica es un campo en el que los formalismos matemáticos han alcanzado un grado de desarrollo notable. En efecto, gracias a dichos formalismos, se pueden modelar fenómenos naturales que van desde el nivel subatómico hasta el cosmológico. En este apartado, se examinan algunos de los formalismos clave en física teórica y se reflexiona acerca del modo en que estos han procurado avances significativos en la comprensión del universo (Greene, 2020; Penrose, 2019; Rovelli, 2018).

Los formalismos en física teórica son fundamentales para la consignación de teorías que describen el comportamiento del universo en sus niveles más básicos. La teoría de la relatividad de Einstein, por ejemplo, se vale de un formalismo geométrico para describir el espacio-tiempo y la influencia de la gravedad. Esta perspectiva ha revolucionado la comprensión del cosmos y ha hecho posible que se hagan predicciones sobre fenómenos como la curvatura de la luz bajo la influencia de la gravedad y la existencia de agujeros negros.

Otro ejemplo de sobra conocido es el de la mecánica cuántica, que se vale de formalismos basados en matrices, funciones de onda y operadores. Merced a estos formalismos, se puede modelar y predecir el comportamiento de las partículas subatómicas, con lo que se superan las limitaciones de la mecánica clásica. La teoría cuántica de campos, que no es sino una extensión de la mecánica cuántica, emplea formalismos avanzados para unificar la teoría cuántica con la relatividad especial; uno de los efectos más positivos de esa unificación es la descripción de las interacciones fundamentales entre las partículas.

A pesar de su éxito, los formalismos de la física teórica también se enfrentan a barreras y desafíos. La falta de una teoría completa de la gravedad cuántica, que unifique la relatividad general y la mecánica cuántica, es uno de los problemas más perentorios de la física teórica contemporánea. Este reto subraya la necesidad de desarrollar nuevos formalismos que puedan abordar los impedimentos actuales.

A modo de ejemplo ilustrativo, véase a continuación cómo un formalismo matemático puede ser utilizado para hacer predicciones precisas y cómo éstas se pueden afinar mediante técnicas experimentales:

el caso de la teoría de la relatividad general de Einstein y su predicción de la deflexión de la luz por un campo gravitacional (Will, 2018).

En 1915, Einstein presentó su teoría de la relatividad general, que describe la gravedad como la curvatura del espacio-tiempo causada por la masa. El formalismo de la relatividad general se basa en las ecuaciones de campo de Einstein, que se pueden expresar, de manera simplificada, así:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1)$$

- $R_{\mu\nu}$ es el tensor de Ricci, que describe la curvatura del espacio-tiempo.
- $g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico, que define la geometría del espacio-tiempo.
- R es el escalar de Ricci, la traza del tensor de Ricci.
- $T_{\mu\nu}$ es el tensor de energía-momento, que describe la distribución de materia-energía.
- G es la constante de gravitación universal.
- c es la velocidad de la luz.

Einstein utilizó este formalismo para predecir que la luz que pasa cerca de un objeto masivo, como el Sol, debería ser desviada a causa de la curvatura del espacio-tiempo. El ángulo de deflexión θ se puede calcular mediante la siguiente fórmula, que se deriva del formalismo de la relatividad general:

$$\theta \approx \frac{4GM}{c^2R} \quad (2)$$

- G es la constante de gravitación universal.
- c es la velocidad de la luz.
- M es la masa del objeto masivo (por ejemplo, el Sol).
- R es la distancia mínima entre el rayo luminoso y el centro del objeto masivo.

Para el Sol, con $\begin{cases} M = M_{Sol} \approx 1.989 \times 10^{30} \text{ Kg} \\ R = R_{Sol} \approx 6.69 \times 10^8 \text{ m} \end{cases}$, el ángulo de deflexión es:

$$\theta \approx \frac{4 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 1.989 \times 10^{30}}{(3 \times 10^8)^2 \times 6.96 \times 10^8} \approx 1.75'' \quad (3)$$

Esta predicción fue puesta a prueba, durante el eclipse solar de 1919, por una expedición liderada por Arthur Eddington. Durante el eclipse, la luz de las estrellas que pasaba cerca del Sol se podía observar y medir, dado que el propio Sol estaba cubierto por la Luna y era posible ver las estrellas durante el día.

Las observaciones confirmaron que la luz de las estrellas era, efectivamente, desviada por el campo gravitacional del Sol, y el ángulo

medido estaba muy cerca del valor predicho por Einstein. Esto confirmó experimentalmente la teoría de la relatividad general.

Desde 1919, esta predicción ha sido afinada con técnicas experimentales mucho más precisas. Una de las más avanzadas la proporcionan los radiotelescopios y los interferómetros de base muy larga, que permiten medir la deflexión de la luz con una precisión sumamente alta. Estos métodos han confirmado la predicción de Einstein con una precisión de varias decenas de milisegundos, y han demostrado que la teoría sigue siendo válida en contextos en los que se requiere una alta exactitud. Estos avances muestran cómo las técnicas experimentales pueden refinar la validación del formalismo de la teoría general de la relatividad y otorgar a ésta una mayor confianza.

Formalismos en economía matemática. La economía matemática se ha beneficiado enormemente del desarrollo de los formalismos que permiten modelar y analizar los fenómenos económicos complejos. En este apartado, se muestra que algunos formalismos matemáticos han colaborado en el desarrollo de ciertas teorías y en la formulación de políticas económicas; también examina las limitaciones de los formalismos cuando estos se aplican a contextos económicos del mundo real (Acemoglu & Robinson, 2019; Piketty, 2020; Varian, 2021).

La economía matemática, en efecto, se nutre de formalismos matemáticos que colaboran en la modelización y la predicción de los comportamientos de los agentes económicos y de las dinámicas de los mercados financieros. Uno de los ejemplos más significativos al respecto es la teoría de juegos, la cual proporciona un marco formal hábil para analizar la toma de decisiones en situaciones de interdependencia estratégica. La teoría de juegos ha sido fundamental en áreas como la economía, la política y la biología evolutiva, ya que ha podido desarrollar estrategias óptimas para la toma de decisiones y análisis rigurosos de los equilibrios económicos.

Otro pilar fundamental de la economía matemática es la microeconomía, que se sirve de formalismos matemáticos para modelar la oferta, la demanda y la formación de precios en los mercados competitivos. Por medio de modelos matemáticos, se pueden analizar las condiciones bajo las cuales los mercados alcanzan ciertos equilibrios; también se puede analizar cómo las políticas gubernamentales pueden consolidar o alterar dichos equilibrios.

La econometría, por su parte, recurre a formalismos estadísticos para validar las teorías económicas mediante el análisis cuantitativo de los datos. Este procedimiento ha sido sumamente relevante para la conformación de políticas económicas basadas en la evidencia empírica. Sin embargo, uno de los retos persistentes a los que se enfrenta es la simplificación excesiva de los modelos, que a veces omite las variables críticas o no aprehenda adecuadamente la complejidad del comportamiento económico.

A modo de ejemplo ilustrativo, véase cómo un formalismo matemático puede ser utilizado para hacer predicciones precisas y cómo éstas se pueden afinar mediante técnicas experimentales: el modelo de equilibrio general de Arrow-Debreu (Smith, 2003).

El modelo de equilibrio general es un formalismo matemático que describe el modo en que los precios y las cantidades de bienes en un sistema económico se determinan simultáneamente en todos los mercados bajo condiciones de competencia perfecta. Matemáticamente, el modelo se basa en un sistema de ecuaciones diferenciales y en el álgebra lineal; en ellas se establece que, bajo ciertas condiciones, existe un conjunto de precios de equilibrio p^* y cantidades x^* tales que:

$$p^*(x_i - y_i) = 0, \forall i \quad (4)$$

- p^* : vector de precios de equilibrio.
- x_i : vector del conjunto de los bienes por parte del agente i .
- y_i : vector de producción de los bienes por parte del agente i .

El teorema de existencia de Arrow-Debreu muestra que, bajo las condiciones mencionadas, existe un conjunto de precios que equilibra todos los mercados en el sistema. Esta formalización permite estudiar cómo los cambios en las condiciones del mercado afectan al equilibrio económico.

Una de las predicciones clave del modelo de Arrow-Debreu es que, en una economía competitiva, los mercados tenderán hacia un equilibrio tal que la oferta iguala a la demanda, y los recursos se podrán asignar de manera eficiente. Este resultado tiene importantes derivaciones para las políticas económicas, ya que sugiere que la intervención de los gobiernos en los mercados competitivos podría ser innecesaria o incluso perjudicial.

Para validar este modelo, se han llevado a cabo numerosos estudios empíricos y experimentos controlados. Por ejemplo, las simulaciones computacionales de los mercados verifican la convergencia hacia un equilibrio competitivo. Además, los estudios de datos macroeconómicos han analizado la manera en que los mercados reales responden a las perturbaciones y si estas respuestas son consistentes con las predicciones del modelo de equilibrio general.

Aunque el modelo de equilibrio general proporciona un marco teórico sólido, su validación en el mundo real requiere de la consideración de comportamientos no estándar, como la racionalidad limitada y las preferencias dinámicas. La economía experimental y la economía conductual han desempeñado, en este sentido, un papel de primera magnitud en la afinación del formalismo. Por ejemplo, se han realizado experimentos en los que los participantes, que simulan ser agentes económicos, realizan transacciones en mercados artificiales. Estos experimentos muestran que, si bien los mercados tienden a acercarse a un equilibrio, el proceso está influido por factores como la información imperfecta, las expectativas adaptativas y las interacciones estratégicas;

dichos factores no son plenamente aprehendidos por el modelo de Arrow-Debreu.

Los resultados de estos experimentos han llevado al desarrollo de modelos más complejos y realistas, como el de equilibrio general computable, que incorpora algunas características de comportamiento observadas y permiten una mejor simulación de políticas económicas y los efectos de éstas en el mundo real.

Formalismos en biología sistémica. La biología se distingue por su enfoque holístico en el estudio de los sistemas biológicos; no es extraño, pues, que se valga de sofisticados formalismos para modelar la complejidad de los fenómenos concernientes a los organismos. Este apartado se ocupa de la manera en que los formalismos posibilitan a los biólogos el entendimiento y la predicción de los comportamientos de los sistemas biológicos complejos, desde las redes genéticas hasta los ecosistemas completos (Alon, 2019; Granovetter, 2017; Kauffman, 2016).

En la biología sistémica, los formalismos son medios clave para modelar y entender la complejidad intrínseca de los sistemas de los seres vivos. Un ejemplo destacado de esto es el empleo de redes para modelar las interacciones genéticas y metabólicas. Gracias a estos formalismos, los científicos pueden mapear el modo en que las variaciones en un componente del sistema pueden afectar a otros componentes del mismo sistema, lo que resulta esencial para entender procesos como la regulación genética y las enfermedades metabólicas.

Además, los modelos de dinámica de sistemas se emplean para simular la interacción entre las especies de un ecosistema; esto facilita la predicción acerca de la manera en que los cambios en una especie o en el entorno pueden afectar al conjunto del sistema. Los formalismos han sido fundamentales para abordar problemas ecológicos complejos, como la conservación de las especies y la gestión sostenible de los recursos naturales.

No obstante, uno de los mayores escollos en biología sistémica es la validación de estos modelos. Debido a la complejidad de los sistemas biológicos y la dificultad para obtener datos precisos, la validación empírica de los formalismos en biología a menudo requiere de complicadas y avanzadas técnicas de simulación y experimentación.

He aquí un ejemplo ilustrativo acerca de cómo un formalismo matemático en biología puede ser utilizado para hacer predicciones precisas y de cómo éstas se pueden afinar mediante técnicas experimentales: el modelo de Lotka-Volterra para la dinámica de las poblaciones (Roughgarden, 2010).

El modelo de Lotka-Volterra también se conoce como el modelo de presa-depredador. Se trata de un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen las interacciones entre dos especies: una de ellas es presa y la otra depredadora:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - \beta xy \\ \frac{dy}{dt} = \delta xy - \gamma y \end{cases} \quad (5)$$

- $x(t)$: población de presas en el tiempo t .
- $y(t)$: población de depredadores en el tiempo t .
- α : tasa de crecimiento de la población de presas en ausencia de depredadores.
- β : tasa de depredación; mide la efectividad con que los depredadores cazan presas.
- γ : tasa de muerte de los depredadores en ausencia de presas.
- δ : tasa de aumento de los depredadores al consumir presas.

El modelo predice que las poblaciones de presas y de depredadores no permanecen constantes, sino que oscilan periódicamente. Estas oscilaciones se deben a la interacción entre las dos especies: cuando la población de presas aumenta, los depredadores tienen más alimento, lo que hace que su población también crezca. Sin embargo, a medida que el número de depredadores aumenta, la población de presas disminuye, lo que lleva a una disminución de la población de depredadores por falta de alimento; esto desemboca en una recuperación de la población de presas, con lo que el ciclo se repite.

El modelo de Lotka-Volterra ha sido refinado mediante datos y técnicas experimentales modernas. Por ejemplo, ciertos experimentos controlados en ecosistemas cerrados han permitido medir con precisión los parámetros del modelo y ajustar las ecuaciones a factores adicionales, como la inmigración, la emigración y la disponibilidad de recursos. Además, los modelos estocásticos incorporan una variabilidad aleatoria en los parámetros del modelo, lo que conduce a una mejor correspondencia con las fluctuaciones observadas en poblaciones reales. Por su parte, los complejos modelos de redes tróficas consideran múltiples especies y sus interacciones simultáneas, en lugar de una sola relación presa-depredador; estos modelos han proporcionado una mejor comprensión de la dinámica de las poblaciones en ecosistemas más diversos, y han ayudado a diseñar mejores estrategias de conservación.

Lecciones aprendidas de los estudios de caso. Los estudios de caso analizados en esta sección proporcionan una visión general del empleo de los formalismos en diferentes áreas de la ciencia. En el presente apartado, se sintetizan las lecciones aprendidas y se ponen de relieve las fortalezas y las debilidades de los formalismos en cada disciplina; y también se reflexiona sobre el papel de dichos formalismos en el avance del conocimiento científico.

A partir de los estudios de caso presentados, emergen varias lecciones acerca del empleo de los formalismos en la ciencia. Primero, es evidente que los formalismos han sido esenciales en la estructuración del conocimiento y a la hora de efectuar predicciones precisas en campos como la física teórica, la economía matemática y la biología sistémica. No

obstante, también está claro que los formalismos tienen impedimentos específicos, especialmente cuando se aplican en contextos en los que la complejidad y la variabilidad de los fenómenos superan la capacidad predictiva de los modelos.

En física teórica, los formalismos han proporcionado avances revolucionarios, pero la falta de una teoría unificada que combine la mecánica cuántica y la relatividad general sigue siendo un escollo insalvable. Este ejemplo pone de manifiesto la importancia de reconocer las debilidades intrínsecas de los formalismos actuales y la urgencia de alcanzar e incrementar una permanente innovación en este ámbito.

En economía matemática, los formalismos han facilitado la creación de modelos sofisticados para entender el comportamiento de los mercados y las decisiones de los agentes económicos. Aun así, la crisis financiera de 2008 destacó las cortapisas de estos modelos, sobre todo cuando se basan en suposiciones simplificadoras que no retratan adecuadamente la complejidad y la incertidumbre del mundo real. Este caso ilustra la necesidad de complementar los formalismos con enfoques críticos y empíricos a fin de mejorar la precisión de las predicciones y la conformación de políticas económicas eficientes.

En biología sistémica, los formalismos han sido cruciales para modelar sistemas biológicos complejos y para comprender las interacciones de los organismos vivos a nivel genético y ecológico. Sin embargo, la validación de estos modelos sigue siendo un desafío difícil de superar debido a la complejidad propia de los sistemas biológicos y a la dificultad de obtener datos empíricos precisos. Esto resalta lo inexcusable de disponer de un enfoque interdisciplinario que combine la modelización formal con las técnicas experimentales y las simulaciones computacionales avanzadas.

En conjunto, los estudios de caso analizados muestran que, aunque los formalismos son instrumentos poderosos para la validación de las teorías científicas, su efectividad depende en gran medida del contexto en que se aplican y de la capacidad de los investigadores para reconocer y gestionar sus limitaciones.

Conclusiones generales

En estas conclusiones, se sintetizan los hallazgos obtenidos, se discuten las implicaciones epistemológicas que surgen de los consiguientes resultados y se sugieren algunas vías para futuras investigaciones. El objetivo de estas conclusiones es proporcionar una visión integral acerca del modo en que los formalismos han desempeñado un papel crucial en la validación de las teorías científicas.

Resumen de los hallazgos más relevantes. La investigación realizada destaca varios puntos fundamentales:

1) *Versatilidad de los formalismos*. Los formalismos lógicos y matemáticos se revelan como unos instrumentos versátiles que han sido aplicados con éxito en diversas disciplinas científicas para estructurar y validar teorías. Los formalismos han proporcionado una representación precisa y generalizada de los fenómenos complejos.

2) *Formalismos y validación*. El presente estudio ha mostrado que los formalismos proporcionan un lenguaje común para expresar teorías científicas y que son fundamentales en la validación de éstas. A través de la formalización, las teorías se pueden confrontar con los datos empíricos y experimentales, a la vez que pueden refinar las teorías existentes o desarrollar otras nuevas.

3) *Evolución histórica*. Los formalismos han evolucionado en paralelo con los avances científicos. La historia de la ciencia muestra una relación bidireccional en la que el desarrollo de nuevos formalismos ha impulsado descubrimientos científicos; y los nuevos descubrimientos científicos han inspirado, a su vez, la creación de formalismos más sofisticados.

4) *Limitaciones y críticas*. Aunque los formalismos han demostrado ser instrumentos poderosos, no están exentos de críticas y limitaciones. Una barrera significativa es la posible desconexión entre los modelos formales y la realidad empírica, especialmente en sistemas extraordinariamente complejos o caóticos, en los que las suposiciones simplificadoras pueden no ser válidas.

Implicaciones epistemológicas. Son las siguientes:

A) *Naturaleza de las teorías científicas*. La investigación ha reforzado la idea de que las teorías científicas no son meros relatos descriptivos, sino estructuras formales que deben tener coherencia interna y estar apoyadas por datos empíricos. El éxito de una teoría depende, en gran medida, de su capacidad para ser formalizada y confrontada con la realidad observable.

B) *Formalismos como herramientas epistemológicas*. Los formalismos actúan como mediadores entre la teoría y la observación, y desempeñan una función importantísima en la estructura y la validación del conocimiento científico. Esto sugiere que la epistemología científica debe considerar la generación de nuevo conocimiento y, al mismo tiempo, debe mostrar cómo se formaliza y valida este conocimiento.

C) *Objeto y forma de la ciencia*. La presente investigación muestra que, en muchos casos, la manera en que se presenta una teoría (a través de algún formalismo) es tan importante como el objeto mismo de la teoría. Las teorías bien formalizadas tienden a ser más robustas, coherentes y susceptibles de falsación, lo que las convierte en auténticos pilares del conocimiento científico.

Grado de cumplimiento de los objetivos. Se estima que el primer objetivo específico, “identificar los tipos de formalismos más comunes de la ciencia”, se ha cumplido, ya que el trabajo ofrece una clasificación de

los formalismos científicos en matemáticos y lógicos, al mismo tiempo que analiza las propiedades esenciales que los distinguen y su evolución histórica. Lo mismo se puede decir del segundo objetivo específico, “comparar el papel de los formalismos con el de la experimentación en la validación de las teorías científicas”; pues se ha podido abordar la relación entre formalismo y validación a través de ejemplos en distintas disciplinas (como la física teórica, la economía matemática y la biología sistémica). Respecto al tercer objetivo específico, “evaluar las limitaciones y los interrogantes que presentan los formalismos en el proceso de validación científica”, se discuten algunas críticas generales y se destacan ciertas limitaciones epistemológicas, incluso desde perspectivas interdisciplinarias y en contextos científicos emergentes. Por último, el trabajo sobresale en el cuarto objetivo específico de “analizar casos de estudio de validación de teorías científicas mediante formalismos”, pues presenta ejemplos prácticos de varias disciplinas emblemáticas.

De todo ello se infiere que el objetivo general, “analizar el rol de los formalismos en la validación de las teorías científicas y evaluar cómo estos contribuyen a la coherencia interna, la precisión predictiva y la aplicabilidad de las teorías en diversas disciplinas”, también se ha alcanzado.

Sugerencias para futuras investigaciones. A partir de los hallazgos de este estudio, se sugieren a continuación algunas recomendaciones de prosecución de la investigación:

Primero, se podrían investigar y desarrollar nuevos formalismos que puedan capturar de manera más efectiva las complejidades de los sistemas altamente no lineales, caóticos o estocásticos, como los de la biología sistémica o la economía globalizada.

Segundo, se podría fomentar la puesta en marcha de investigaciones interdisciplinarias que integren los formalismos de distintas áreas científicas para tratar de obtener avances significativos. Por ejemplo, la combinación de formalismos matemáticos y computacionales podría abrir nuevas vías en el modelado de fenómenos complejos en ciencias naturales y sociales.

Es fundamental que los formalismos continúen siendo validados y refinados mediante datos experimentales y empíricos. A este respecto, se podría fortalecer la conexión entre la teoría formal y los experimentos de campo, particularmente en disciplinas como la biología de sistemas y la economía conductual.

Por último, se podrían realizar estudios críticos que examinen las limitaciones y potenciales sesgos introducidos por la excesiva dependencia de los formalismos, sobre todo en contextos en los que la realidad puede no ser capturada de modo adecuado por los modelos formales.

Referencias bibliográficas

- Acemoglu, D. & Robinson, J. A. (2019). *The Narrow Corridor: States, Societies and the Fate of Liberty*. New York: Penguin Press.
- Al-Khwarizmi (1989). *The Algebra of Mohammed ben Musa* (F. Rosen, Ed.). London: Oriental Translation Fund.
- Alon, U. (2019). *An Introduction to Systems Biology: Design Principles of Biological Circuits*. Boca Raton: CRC Press.
- Aristotle (2016). *The Organon: The Works of Aristotle on Logic* (J. Barnes, Ed.). Princeton: Princeton University Press.
- Blackburn, P., Rijke, M. & Venema, Y. (2002). *Modal Logic*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bowen, G. A. (2009). Document Analysis as a Qualitative Research Method. *Qualitative Research Journal*, 9 (2), 27-40.
- Boyce, W. E. & Di Prima, R. C. (2017). *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. New York: Wiley.
- Cartwright, N. (1999). *The Dappled Word: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cartwright, N. (2017). *Cómo funcionan las leyes científicas*. Barcelona: Herder.
- Cauchy, A.-L. (2009). *Cours d'Analyse de l'École Royale Polytechnique*. New York: Springer.
- Danzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (2011). *The SAGE Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Einstein, A. (1996). *Relativity: The Special and the General Theory*. New York: Crown Publishers.
- Enderton, H. B. (2001). *A Mathematical Introduction to Logic*. San Diego: Academic Press.
- Euclides (1956). *The Thirteen Books of Euclid's Elements* (T. L. Heath, Ed.). New York: Dover Publications.
- Flyvbjerg, B. (2006). Five Misunderstanding About Case-Study Research. *Qualitative Inquiry*, 12 (2), 219-245.
- Gadamer, H.-G. (1975). *Truth and Method*. New York: Continuum Publishing.
- Granovetter, M. (2017). *Redes sociales y mercados económicos*. Madrid: Alianza Editorial.
- Hacking, I. (1990). *Representar e intervenir: Introducción a la filosofía de la ciencia natural*. Barcelona: Editorial Crítica.

- Greene, B. (2020). *Hasta el final del tiempo: La mente, la materia y nuestra búsqueda de significado en un universo en evolución*. Barcelona: Crítica.
- Heisenberg, W. (1949). *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Chicago: University of Chicago Press.
- Hempel, C. G. (1965). *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. New York: The Free Press.
- Holton, G. (1996). *Einstein, History, and Other Passions: The Rebellion against Science at the End of the Twentieth Century*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Hurley, P. J. (2016). *A Concise Introduction to Logic*. Boston: Cengage Learning.
- Kauffman, S. (2016). *En el borde del caos: La búsqueda de la organización en un universo complejo*. Buenos Aires: Katz.
- Kuhn, T. S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. México. Fondo de Cultura Económica.
- Lakatos, I. (1983). *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza Editorial.
- Lederman, W. & Reeder, M. (2012). *Introduction to Group Theory*. New York: Dover Publications.
- Maxwell, J. C. (1998). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press.
- Morin, E. (2021). *La mente bien ordenada: Repensar la reforma, reformar el pensamiento*. Barcelona: Seix Barral.
- Morrison, M. (1999). *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Newton, I. (1999). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (I. B. Cohen & A. Whitman, Eds.). Berkeley: University of California Press.
- Patton, M. Q. (2015). *Qualitative Research and Evaluation Methods: Integrating Theory and Practice*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Penrose, R. (2019). *La moda, la fe y la fantasía en la nueva física del universo*. Madrid: Debate.
- Piketty, T. (2020). *Capital e ideología*. Barcelona: Deusto.
- Popper, K. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. London: Routledge.
- Ragin, C. C. (2014). *The Comparative Method: Moving Beyond Qualitative and Quantitative Strategies*. Oakland: University of California Press.
- Romer, P. M. (2018). *Teoría del crecimiento endógeno*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.

- Roughgarden, J. (2010). *The Theory of Population Genetics and Evolutionary Ecology: An Introduction*. New York: Macmillan.
- Rovelli, C. (2018). *El orden del tiempo*. Barcelona: Anagrama.
- Russell, B. & Whitehead, A. N. (1993). *Principia Mathematica*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Smith, V. L. (2003): Constructivist end Ecological Rationality in Economics. *American Economic review*, 93 (3), 465-508.
- Smith, P. (2017). *An Introduction to Formal Logic*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stake, R. E. (1995). *The Art of Case Study Research*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Stewart, J. (2015). *Calculus: Early Transcendental*. Boston: Cengage Learning.
- Strang, G. (2016). *Introduction to Linear Algebra*. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press.
- Suppes, P. (2002). *Representation and Invariance of Scientific Structures*. Stanford: CSLI Publications.
- Tall, D. (2017). *How Humans Learn to Think Mathematically: Exploring the Three Worlds of Mathematics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Varian, H. R. (2021). *Microeconomía intermedia: Un enfoque moderno*. Madrid: Antoni Bosch.
- Will, C. M. (2018). *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Winsberg, B. (2011). *Simulación y realidad: La ciencia en la edad de la computación*. Madrid: Tecnos.
- Zwiebach, B. (2009). *A first Course in String Theory*. Cambridge: Cambridge University Press.