

KNO-011 · Medir antes de teorizar

KNO · Formas de conocer

Juan Segurola

v0.1 · ES

Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

Suele decirse que la teoría indica a los científicos qué medir, y con frecuencia lo hace. Este artículo sigue la dirección contraria, en la que los números llegan primero y se sostienen hasta que una explicación los alcanza, y no trata ninguna como la regla. Abre con la pregunta que KNO-010 entregó, si clasificar en categorías cuenta ya como medir, y nombra las dos respuestas sin adoptar ninguna. Toma después tres casos en los que el número llegó antes: un termómetro en el que había que confiar antes de poder comprobarlo, medidas en longitudes de onda largas que una fórmula célebre se escribió para ajustar, y un residuo orbital que ninguna teoría disponible explicaba. Cierra con el movimiento inverso de 2019, cuando una constante medida un siglo pasó a ser una definición. El diseño experimental, el análisis de la incertidumbre y la estructura de los registros corresponden a artículos posteriores.

En 60 segundos

Los dos órdenes existen y ninguno es el que este campo sigue: a veces la teoría nombra una magnitud y un experimento va a buscarla, y a veces los números se acumulan hasta que una teoría tiene que reproducirlos. Si clasificar cuenta ya como medir depende de qué definición esté en vigor, y aquí se nombran la permisiva y la restrictiva sin adoptar ninguna. Hay que confiar en un instrumento antes de que exista nada capaz de comprobarlo, y en los episodios que se tratan el círculo no se evitó en lugar de romperse. Una fórmula puede escribirse para acertar un blanco que la medida ya había puesto: una comunicación sobre el comportamiento en longitudes de onda largas llegó antes y la ecuación después, lo que es un orden de los hechos y no una explicación de qué causó qué. Un residuo informa del tamaño del fallo de una teoría y obliga solo a las sucesoras que cubran el mismo dominio observacional, con la precisión que allí importa. En 2019 una constante medida pasó a ser definida, y el valor definitorio no tiene incertidumbre alguna; lo que la carga ahora es la realización de la unidad.

Por qué importa esta pregunta

Un número ofrecido como medida no se explica solo. Leído sin preguntar qué validó el instrumento, si la magnitud se teorizó antes, y si la cifra es un valor o un residuo, ese mismo número acabará sosteniendo conclusiones que no puede cargar. Las distinciones que aquí se hacen son las que permiten a quien lee ver que una fórmula respondía ante los datos antes de significar nada, que una corrección pequeña y estable puede sobrevivir a todos los intentos de explicarla, y que una constante puede dejar de medirse por decisión y no por hallazgo.

1. Dos órdenes, y por qué ninguno es la regla

Existe un relato ordenado en el que la teoría va primero. Una teoría afirma que cierta magnitud existe, dice aproximadamente cuánto debería valer, y a continuación se diseña un experimento para encontrarla. Buena parte de la física moderna funciona así, y el relato no es falso.

Existe un relato igual de ordenado en sentido contrario. Se mide algo porque se puede, los números se acumulan, aparece una pauta en ellos, y acaba construyéndose una teoría que tiene que reproducir esa pauta o ser descartada. Buena parte de la historia de la física y de la química funciona también así, y ese relato tampoco es falso.

Lo falso es tratar cualquiera de los dos como el orden de la ciencia. Las dos direcciones coexisten, se alternan dentro de un mismo programa de investigación y a veces operan sobre la misma magnitud en momentos distintos. Este artículo desarrolla la segunda dirección porque es la que suele quedarse fuera, no porque sea la verdadera, y la sección 6 muestra la primera imponiéndose de forma concluyente en un caso donde la segunda había regido durante un siglo.

En qué punto estamos

Dos relatos ordenados van en sentidos opuestos y los dos describen práctica real, y por eso ninguno es el orden que este campo sigue. Que la teoría nombre una magnitud y un experimento vaya a por ella ocurre; que los números se acumulen hasta que una teoría tenga que reproducirlos ocurre también, a veces sobre la misma magnitud. Aquí se desarrolla el segundo porque suele quedar fuera.

2. Qué cuenta como medir, y la pregunta que KNO-010 dejó abierta

KNO-010 se detuvo en la categoría y entregó una pregunta que no argumentó: si asignar una cosa a una categoría es ya una medida. Hay que responderla antes que nada aquí, porque de la respuesta depende qué cuenta como caso.

La respuesta permisiva es la más citada. Stevens define la medida, en el sentido más amplio, como la asignación de numerales a objetos o sucesos de acuerdo con reglas [1]. Sobre esa definición sus cuatro tipos de escala se siguen de lo que la asignación permite hacer. Su tabla los separa por la operación empírica básica de cada uno: la escala nominal por determinación de igualdad, la ordinal por determinación de mayor o menor, la de intervalo por determinación de igualdad de intervalos o diferencias, y la de razón por determinación de igualdad de razones [2].

La respuesta restrictiva objeta que así la pregunta deja de poder plantearse. Michell observa que, bajo la posición de Stevens, cualquier regla para hacer asignaciones numéricas define siempre al menos una escala nominal [3]. Si cualquier regla produce una medida, entonces nunca se somete a prueba si el atributo estudiado es cuantitativo de entrada, y ese es exactamente el cargo de Michell contra un siglo de psicología cuantitativa: la cuestión científica de la aditividad de los atributos implicados casi nunca se abordó [4].

Ambas posiciones quedan registradas y no se adopta ninguna. La consecuencia para este artículo es solo procedimental, y basta con ella. **Bajo la definición permisiva, clasificar es medir en la escala más débil; bajo la restrictiva, no es medir en absoluto mientras no se muestre que el atributo es cuantitativo.** Todo lo que sigue trata de magnitudes que satisfacen también la definición restrictiva, de modo que los casos de abajo se sostienen bajo cualquiera de las dos lecturas. Cuando un artículo necesite que la distinción haga trabajo real, debe decir qué definición está usando, porque las dos discrepan sobre qué se ha logrado cuando se produce un número.

En qué punto estamos

Si clasificar cuenta ya como medir depende de la definición en vigor. La permisiva admite cualquier asignación de numerales regida por reglas y ordena los resultados por lo que la asignación permite; la restrictiva objeta que así nunca se somete a prueba si el atributo es cuantitativo. Las dos quedan registradas y no se adopta ninguna, y todo lo de abajo satisface la lectura más estricta.

3. Validar un instrumento sin un patrón detrás

La primera dificultad de medir antes de teorizar no es la teoría. Es que hay que confiar en el instrumento antes de que exista nada capaz de comprobarlo.

El termómetro es el ejemplo permanente. Para saber si un termómetro marca correctamente hace falta una temperatura conocida, y para conocer una temperatura hace falta un termómetro. El trabajo de los siglos XVIII y XIX sobre los puntos fijos fue un intento de romper ese círculo desde dentro, y es el asunto del estudio de Chang, que su editorial describe como un examen de cómo aquellos científicos lograron evaluar la fiabilidad y la exactitud de esos instrumentos sin apoyarse circularmente en los propios instrumentos [5].

El círculo no es un escándalo, y en los casos que este artículo trata no se evitó. Varios patrones de medida fueron establecidos en algún momento por instrumentos que después ese mismo patrón sirvió para juzgar. Si eso vale para todo patrón no se establece aquí y no se afirma. Lo que puede exigirse a un proceso así no es que parta de la certeza, sino que cada vuelta deje a la siguiente en mejor posición, y que las mejoras sean visibles en lugar de supuestas. Este artículo no desarrolla la epistemología general de ese proceso, que es el objeto del libro de Chang y excede el alcance de la serie. **Lo que aquí se usa de ese libro se limita a lo comprobado directamente sobre su resumen y su índice oficiales.** Su cuerpo no se leyó, de modo que nada de esta sección le atribuye un argumento más allá de la descripción que da su editorial.

Una consecuencia importa aquí. Una magnitud puede medirse bien, de forma consistente y útil durante mucho tiempo antes de que exista teoría alguna de qué se está midiendo. La temperatura se midió durante un periodo largo antes de que la termodinámica diera cuenta de ella, y este artículo no fija la duración de ese periodo, que depende de qué se cuente como medida y de qué exposición de la termodinámica se tome como llegada. Las medidas no esperaban a la teoría; fue la teoría la que tuvo que acomodarlas.

En qué punto estamos

Hay que confiar en un instrumento antes de que exista nada capaz de comprobarlo, y el termómetro es el caso permanente. En los episodios que se tratan el círculo no se evitó; hasta dónde llega eso no se zanja aquí. Lo que un proceso así debe no es certeza al empezar sino mejora visible en cada vuelta. Una magnitud puede medirse bien mucho antes de que algo la explique.

4. Una fórmula construida para ajustar las medidas

El caso más claro de una teoría construida para reproducir un número es también uno de los de mayores consecuencias, y su relato habitual invierte el orden.

Hacia 1900 existían varias leyes de radiación en competencia para la emisión de un cuerpo negro. González de Arrieta registra que todas eran compatibles con las propiedades esperadas de la radiación del cuerpo negro pero que, de forma decisiva, cada una predecía comportamientos distintos para valores grandes del producto λT [6]. El desacuerdo quedaba por tanto localizado con precisión: las leyes eran indistinguibles en el rango accesible y solo se separaban en longitudes de onda largas, lo que es la descripción de un experimento pendiente de hacer.

Rubens y Kurlbaum lo hicieron. Se propusieron mejorar un experimento de rayos residuales ya existente, usando cuatro cavidades de cuerpo negro que abarcaban un intervalo de temperaturas de -180 a 1600 °C [7]. El resultado fue concluyente primero en sentido negativo: ninguna de aquellas expresiones reproducía con precisión los datos observados para todas las temperaturas [8].

Lo que ocurrió después es el punto de esta sección. El 7 de octubre de 1900 Rubens comunicó a Planck que el límite de la ley de radiación para λT grande era una función lineal de la temperatura, y Planck rehízo las propiedades termodinámicas de su sistema de cuerpo negro de base empírica y produjo una ecuación que predecía los fenómenos observados [9]. **La secuencia es la que registra la fuente, y este artículo la lee como secuencia:** la comunicación llegó antes y la ecuación después, lo cual no es por sí solo una explicación de qué causó qué. Rubens confirmó el ajuste, y los dos resultados se presentaron juntos: Rubens contestó que la ecuación propuesta ajustaba los resultados a la perfección, y tanto Planck como Rubens y Kurlbaum presentaron sus resultados en la misma sesión de la Sociedad de Física el 19 de octubre [10].

La fórmula respondía ante las medidas desde el momento en que se escribió. Su interpretación física, la que la convirtió en un resultado fundacional de la teoría cuántica, llegó después y hubo de conciliarse con una fórmula que ya existía y ya funcionaba. Eso es medir antes de teorizar en su forma más fuerte, y conviene notar que el artículo no afirma que la medida causara la teoría. Afirma algo más débil y más defendible: **la teoría tenía un blanco que acertar, y el blanco lo puso la medida.**

En qué punto estamos

Las leyes de radiación rivales coincidían donde los instrumentos llegaban y se separaban solo en longitudes de onda largas, lo que describe un experimento pendiente. Se hizo, ninguna de las expresiones lo sobrevivió, y la ecuación que sí lo hizo llegó tras una comunicación sobre el comportamiento del límite. Ese orden de los hechos es el que registra la fuente. La fórmula respondía ante los números desde que existió.

5. Un residuo que estableció la medida y no explicó la teoría

Una medida puede además producir un número que ninguna teoría explica, y mantenerlo en pie durante décadas.

En 1859 Le Verrier dirigió a Faye una carta sobre la teoría de Mercurio y el movimiento del perihelio de ese planeta, publicada en los Comptes rendus de la Académie des sciences [11]. Su hallazgo era cuantitativo y estrecho. Tal como está impreso el pasaje, bastó aumentar en treinta y ocho segundos de arco el movimiento secular del perihelio para representar todos los pasos observados con un margen inferior a un segundo [12].

Leída con cuidado, esa frase tiene una estructura inusual para un descubrimiento. No informa de un objeto nuevo ni de un efecto nuevo. **Informa del tamaño de la corrección que hay que aplicar a una teoría existente para que esa teoría se ajuste a las observaciones**, es decir, informa de la magnitud exacta del fallo de la teoría. La corrección era pequeña, era estable y no se iba a marchar.

Un residuo de esta clase es un objeto científico peculiarmente duradero, y conviene enunciar de forma transferible la regla para leerlo. Un residuo es una estimación que depende de las observaciones que hay detrás, de los parámetros usados y del modelo del que es residuo. Restringe por tanto solo a las teorías sucesoras que pretendan cubrir el mismo dominio observacional, y solo con la precisión que allí resulte pertinente. No es una anomalía en el sentido laxo de algo raro; es un número, establecido por medida, que una teoría sucesora que cubra el mismo terreno tiene que reproducir dentro de esa precisión. Sobrevivió a todos los intentos de explicarlo ajustando el inventario de masas del sistema solar, y seguía ahí cuando más de medio siglo después llegó una teoría que lo predecía. **No seguía ahí sin cambios.** Laskar recoge la cifra de Le Verrier como unos treinta y ocho segundos de arco por siglo, obtenida de veintiuna observaciones de tránsitos entre 1697 y 1848, frente a los aproximadamente cuarenta y tres segundos de arco por siglo que da la

teoría posterior [12]. Son valores próximos y no son el mismo número, y la diferencia es la que hay entre una estimación y una predicción, no un defecto de ninguna de las dos. Este artículo se detiene deliberadamente en el residuo y no trata la explicación posterior, que pertenece a la historia de la gravitación y no a la epistemología de la medida.

En qué punto estamos

Una medida puede dejar un número que ninguna teoría explica y sostenerlo décadas. No se informó de un objeto nuevo sino del tamaño de la corrección que una teoría existente necesitaba, la magnitud de su fallo. Una cifra así es una estimación, así que obliga solo a las sucesoras que cubran el mismo terreno con la precisión que allí importa, y el valor posterior es próximo sin ser el mismo.

6. Cuando una constante medida pasa a ser definida

Las tres secciones anteriores van todas de la medida hacia la teoría. El cambio grande más reciente en metrología va en sentido contrario, y conviene ponerlo al lado para que el artículo no sea una historia de dirección única.

Hasta 2019 el kilogramo era un objeto. Como afirma el apéndice oficial del folleto del SI dedicado al kilogramo, la definición anterior del kilogramo se basaba en la masa del prototipo internacional del kilogramo inmediatamente después del procedimiento de limpieza prescrito [13]. Todo lo expresado en kilogramos era, en última instancia, una comparación con un artefacto.

La Resolución 1 de la 26.^a Conferencia General de Pesas y Medidas, adoptada en 2018 y en vigor desde el 20 de mayo de 2019, sustituyó aquello por una constante. El kilogramo queda definido tomando el valor numérico fijo de la constante de Planck h como $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ cuando se expresa en la unidad $J\,s$, que es igual a $kg\,m^2\,s^{-1}$ [14].

La inversión es completa y conviene enunciarla sin rodeos. La constante de Planck se midió, con precisión creciente, durante un periodo largo antes de que su valor quedara fijado; este artículo no pone cifra a ese periodo. Ya no se mide, porque ya no tiene un valor que encontrar: su valor numérico está ahora fijado por definición, y la declaración oficial es inequívoca al afirmar que los valores numéricos de las siete constantes definitorias no tienen incertidumbre [15]. La incertidumbre no desapareció. Se desplazó. Donde antes había una constante incierta y una unidad exacta, ahora hay una constante exacta y una unidad cuya realización carga con la incertidumbre.

La propia resolución registra qué le ocurrió al prototipo, y conviene leerlo con exactitud. El Apéndice 2 de la propia Resolución 1, bajo *Status of constants previously used in the former definitions*, afirma que desde el 20 de mayo de 2019 la masa del prototipo internacional del kilogramo es de 1 kg dentro de una incertidumbre típica relativa igual a la del valor recomendado de la constante de Planck en el momento de adoptarse la resolución, $1,0 \times 10^{-8}$, y que a partir de entonces su valor se determina experimentalmente [16]. **Esto no es una cantidad conservada que cambie de manos.** La constante definitoria no tiene incertidumbre alguna, que es el enunciado aparte de más arriba con su propia fuente; lo que este apéndice añade es que el artefacto pasa a tener una masa determinada experimentalmente que carga con una incertidumbre heredada, de modo que *se desplazó*, en el párrafo anterior, describe dónde se hace el trabajo y no una cantidad que se pase de mano en mano.

Esto es una convención metrológica, adoptada deliberadamente, y no un caso de la teoría diciendo a la medida qué hacer. Un comité decidió fijar un número que hasta entonces se buscaba, y fue posible solo porque la medida había hecho la constante lo bastante conocida como para que fijarla no cambiara nada en la práctica. Las dos direcciones no rivalizan aquí. La segunda se la ganó la primera.

En qué punto estamos

El cambio grande más reciente fue en sentido contrario. Una constante medida durante un siglo quedó fijada por decisión, y el valor definitorio no tiene incertidumbre porque ya no hay nada que encontrar. El prototipo conserva una masa determinada experimentalmente que carga con una incertidumbre relativa heredada. Nada se pasó de mano en mano: lo que cambió es dónde se hace el trabajo de determinar.

7. Leer bien una medida

Lo que sostienen las secciones anteriores es un conjunto breve de preguntas que plantear a cualquier número ofrecido como medida.

¿Qué definición de medida está en juego? Bajo la permisiva, una clasificación con numerales adheridos cuenta. Bajo la restrictiva, nada cuenta mientras no se muestre que el atributo es cuantitativo. Las dos discrepan sobre qué se ha establecido.

¿Qué validó el instrumento, y qué validó eso? Toda cadena termina en algún sitio, y lo interesante es si el último eslabón se examinó o se supuso.

¿Se teorizó la magnitud antes de medirla? Si no, las medidas no confirman nada y no deben leerse como si lo hicieran.

¿Este número es un valor o un residuo? Un residuo informa del tamaño del fallo de una teoría, y restringe a las sucesoras de un modo en que una medida corriente no lo hace.

¿Se sigue midiendo la constante? Algunas no, por decisión. Una constante definida no tiene incertidumbre porque la incertidumbre se ha desplazado a otro sitio, no porque se haya eliminado.

¿Qué haría falta para que este número cambiara? Un instrumento mejor, una redefinición o una reinterpretación son respuestas distintas con consecuencias distintas, y un número que no puede cambiar por ninguna de las tres probablemente no es una medida.

Medir antes de teorizar no es una actividad menor ni preliminar. Produce las restricciones ante las que las teorías responden, y de vez en cuando produce un número que permanece sin explicar durante cincuenta años y que durante todo ese tiempo era correcto.

En qué punto estamos

El artículo termina en preguntas que plantear a cualquier número ofrecido como medida. Qué definición está en vigor, qué validó el instrumento y qué validó eso, si la magnitud se teorizó antes, si la cifra es un valor o un residuo, si se sigue midiendo, y qué tendría que ocurrir para que cambiara. Qué establecen las secciones, y cómo, es lo que sigue.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

La definición permisiva toma la medida como la asignación de numerales a objetos o sucesos de acuerdo con reglas, y separa cuatro tipos de escala por la operación empírica que cada uno permite. La objeción restrictiva es que, bajo esa visión, cualquier regla define ya al menos una escala nominal, de modo que nunca se somete a prueba si el atributo es cuantitativo. Las leyes de radiación en competencia diferían solo en longitudes de onda largas; un experimento de rayos residuales con cuatro cavidades encontró que ninguna reproducía los datos a todas las temperaturas; una comunicación sobre el límite en longitudes de onda largas precedió a la ecuación que funcionó, y los dos resultados se presentaron en la misma sesión. La corrección de Le Verrier al movimiento secular del perihelio de Mercurio la recoge Laskar como unos treinta y ocho segundos de arco por siglo a partir de veintiuna observaciones de tránsitos, frente a unos cuarenta y tres de la teoría posterior. La Resolución 1 define el kilogramo fijando la constante de Planck, las siete constantes definitorias no tienen incertidumbre, y el Apéndice 2 de esa misma resolución sitúa el prototipo en 1 kg dentro de la incertidumbre típica relativa heredada, determinada experimentalmente desde entonces. El estudio de Chang se usa solo como lo describe su editorial; su cuerpo no se leyó aquí.

Lo que todavía no sabemos

Si la circularidad descrita vale para los patrones de medida en general, cosa que la sección 3 declina establecer. Cuánto tiempo se midió la constante de Planck antes de que su valor quedara fijado, y cuánto se midió la temperatura antes de que la termodinámica diera cuenta de ella, dos periodos a los que este artículo no pone cifra. Qué argumenta el libro de Chang, frente a lo que su editorial dice que examina. Y qué causó qué en octubre de 1900: el orden de los hechos queda registrado y la pregunta causal queda abierta.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

Una lectura del argumento de Chang, y no de la descripción de su editorial, zanjaría qué establece ese estudio sobre romper el círculo. Mostrar que algún patrón de medida se validó sin apoyarse nunca en instrumentos que después juzgó estrecharía lo que la sección 3 declina generalizar. Sobre el residuo, importaría una teoría sucesora que cubriera el mismo dominio observacional y no reprodujera la cifra con la precisión pertinente; una que cubriera otro terreno no. Y una decisión metrológica que dejara de fijar una constante definitoria la devolvería a la medida.

Si solo recuerdas una cosa

Los números llegan a menudo antes que las teorías que los explican, así que pregunta ante qué respondía una medida antes de preguntar si es verdadera.

Artículos relacionados

- KNO-010 · *La clasificación como herramienta de conocimiento*

Referencias

Los números entre corchetes del cuerpo son números de afirmación y no de referencia. Cada uno remite a una fila de KNO-011_CLAIMS_AND_SOURCES_RECONSTRUCTION.md, que da una fuente académica u oficial para cada una y nombra la entrada de abajo que la sostiene. Las afirmaciones inciertas, los límites de alcance declarados y las fuentes excluidas se enumeran en KNO-011_UNCERTAINTIES_RECONSTRUCTION.md.

BIPM. 2018. *Resolution 1 of the 26th CGPM (2018): On the revision of the International System of Units (SI)*. Conférence Générale des Poids et Mesures. URL estable: <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1> DOI 10.59161/CGPM2018RES1E

BIPM. 2021. *SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2*, 7 de julio de 2021. Bureau International des Poids et Mesures. URL estable: <https://www.bipm.org/documents/20126/41489673/SI-App2-kilogram.pdf>

BIPM. Página «SI defining constants». Bureau International des Poids et Mesures. **Sin fecha mostrada en la página**. URL estable: <https://www.bipm.org/en/measurement-units/si-defining-constants>

Chang, Hasok. 2004. *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress*. Oxford Studies in Philosophy of Science. Oxford University Press. ISBN impreso 9780195171273. URL estable: <https://global.oup.com/academic/product/inventing-temperature-9780195171273> **Manifestación en línea, Oxford Academic**: ISBN en línea 9780199835003, DOI 10.1093/0195171276.001.0001, <https://academic.oup.com/book/5530>

González de Arrieta, Iñigo. 2022. «Beyond the infrared: a centenary of Heinrich Rubens's death». *The European Physical Journal H* 47: artículo 11. DOI 10.1140/epjh/s13129-022-00044-x

Laskar, Jacques. 2017. «Des premiers travaux de Le Verrier à la découverte de Neptune». *Comptes Rendus Physique* 18: 504–519. DOI 10.1016/j.crhy.2017.10.011

Michell, Joel. 1997. «Quantitative science and the definition of measurement in psychology». *British Journal of Psychology* 88: 355–383. DOI 10.1111/j.2044-8295.1997.tb02641.x URL estable: <https://errorstatistics.com/wp-content/uploads/2015/02/michell-1997-1.pdf>

Stevens, S. S. 1946. «On the Theory of Scales of Measurement». *Science* 103 (2684): 677–680. **Sin DOI localizado sobre página consultada**. URL estable: <https://dl.icdst.org/pdfs/files3/38396a3ee53de9478a57af4605f0e1c1.pdf>