

Probabilidad: un cálculo para alternativas inciertas

IDE-008 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.5 ES · 19 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: Probabilidad matemática, inferencia estadística y azar físico

Límite: Probabilidad como cálculo e interpretación; medición y observación se tratan en IDE-014 e IDE-023

Trabajos relacionados: IDE-003, IDE-017, IDE-023

Perfil epistémico: Matemática establecida con aplicaciones físicas dependientes de la interpretación

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

La probabilidad proporciona un cálculo coherente para razonar sobre alternativas inciertas una vez especificados los sucesos, las variables y los supuestos de fondo. Sus reglas restringen cómo se combinan y actualizan las probabilidades, pero la misma matemática admite interpretaciones distintas: frecuencias a largo plazo, grados de creencia, propensiones o resúmenes de información incompleta. Este artículo separa el núcleo formal de esas interpretaciones. Explica por qué la probabilidad condicional tiene dirección, por qué la regla de Bayes necesita tasas base, cómo difieren las probabilidades de la mecánica estadística de las cuánticas y por qué los resultados de tipo Bell restringen ciertas explicaciones de variables ocultas sin convertir la probabilidad en una sustancia física. La lección central es metodológica: un número de probabilidad nunca se interpreta solo. Su significado depende del espacio de sucesos, los supuestos del modelo y el procedimiento que conecta el número con observaciones y, cuando la probabilidad es condicional, de la información condicionante.

En 60 segundos

Un modelo probabilístico empieza definiendo alternativas y asignando números entre cero y uno que obedecen reglas de consistencia. La probabilidad condicional $P(A|B)$ significa la probabilidad de A dentro de los casos en los que B se toma como dado; en general no es igual a $P(B|A)$. La regla de Bayes conecta ambas direcciones, pero solo mediante probabilidades previas o tasas base. Los métodos frecuentistas enfatizan el comportamiento bajo muestreo repetido, mientras los bayesianos tratan la probabilidad como incertidumbre coherente condicionada a información; ambos usan el mismo cálculo subyacente en muchas aplicaciones ordinarias.[1,2] En mecánica estadística, las probabilidades resumen distribuciones sobre muchas posibilidades microscópicas y conectan predicciones macroscópicas con una especificación incompleta del microestado.[3] En teoría cuántica, las probabilidades entran en las reglas predictivas incluso para estados cuidadosamente preparados,

mientras las desigualdades de Bell muestran que las correlaciones que predice la teoría cuántica no pueden reproducirse mediante amplias clases de modelos locales de variables ocultas.[5] La probabilidad organiza así incertidumbre y predicción, pero no nos dice por sí sola si la incertidumbre es epistémica, física o una mezcla de ambas.

Por qué importa esta pregunta

La probabilidad aparece en casi toda ciencia cuantitativa, pero la misma notación puede ocultar preguntas muy distintas. Una prueba médica, una previsión meteorológica, una medida cuántica y un ensemble termodinámico pueden producir números entre cero y uno, aunque el significado evidencial de esos números no sea idéntico. Confundir $P(A|B)$ con $P(B|A)$, ignorar tasas base o tratar una probabilidad de modelo como propiedad intrínseca de un objeto puede producir errores muy seguros de sí mismos. Un lenguaje probabilístico claro no es, por tanto, una trivialidad contable. Forma parte de la lógica mediante la que la evidencia se traduce en inferencia, predicción y decisiones bajo incertidumbre. [1,4]

1. El núcleo formal: sucesos, medidas y consistencia

El núcleo matemático moderno de la probabilidad comienza con un espacio de resultados posibles, una colección de sucesos y una medida de probabilidad que asigna números a esos sucesos. Las restricciones familiares son sencillas pero poderosas: las probabilidades son no negativas, el espacio completo tiene probabilidad uno y las alternativas mutuamente excluyentes se suman. La axiomatización de Kolmogórov hizo explícita esa estructura y separó el cálculo de cualquier interpretación filosófica particular.[2]

Cox llegó al mismo territorio desde otra dirección. Preguntó qué reglas debería obedecer una representación numérica de la plausibilidad si el razonamiento ha de seguir siendo consistente al combinar proposiciones. Bajo supuestos explícitos, el cálculo resultante es equivalente en forma a la teoría ordinaria de la probabilidad.[1] La importancia no es que toda incertidumbre deba ser subjetiva, sino que la consistencia interna restringe con fuerza cómo pueden combinarse proposiciones inciertas.

Una medida de probabilidad se define sobre un espacio de sucesos especificado, y una probabilidad condicional especifica además su condición; la formulación de Cox también condiciona la plausibilidad a proposiciones o conocimiento de fondo.[1,2] Decir que un suceso tiene probabilidad 0,2 no identifica si el número es un parámetro de modelo, una frecuencia límite, un grado posterior de creencia o una predicción cuántica.

En qué punto estamos

La probabilidad tiene un esqueleto matemático estable, pero un valor numérico adquiere significado científico solo cuando se especifican las alternativas y, cuando corresponda, los supuestos condicionantes. Esto separa el cálculo del debate sobre qué representa la probabilidad. El siguiente paso es el condicionamiento, porque muchos errores prácticos nacen no de las reglas de suma sino de cambiar la información disponible sin seguir el cambio de la afirmación probabilística.

2. Condicionamiento, Bayes y la dirección de la evidencia

La probabilidad condicional tiene dirección. $P(A|B)$ pregunta con qué frecuencia o plausibilidad aparece A dentro de los casos en que B se da por supuesto; $P(B|A)$ formula la pregunta inversa. Ambas se conectan mediante la regla de Bayes, $P(A|B) = P(B|A)P(A)/P(B)$, de modo que invertir una condición requiere las tasas base relevantes.[2] Una prueba muy precisa puede, por ello, producir una probabilidad posterior moderada cuando la condición buscada es rara.

No es solo una trampa de aula. La selección experimental, el cribado diagnóstico y el filtrado observacional pueden cambiar la población a la que se aplica una probabilidad. Tversky y Kahneman documentaron errores sistemáticos en juicios bajo incertidumbre, incluido el descuido de probabilidades previas en algunos contextos.[4] Trabajos posteriores han refinado cuánto dependen esos sesgos de la representación y del diseño de la tarea, pero el punto matemático permanece: la condicional inversa no se obtiene de la directa por sí sola.

Los procedimientos bayesianos y frecuentistas suelen responder preguntas operativas distintas. Un intervalo de confianza se define mediante propiedades de muestreo repetido de un procedimiento, mientras un intervalo creíble bayesiano es una afirmación de probabilidad sobre un parámetro condicionada a un modelo y un prior. En problemas regulares con muchos datos los resultados numéricos pueden converger, pero las interpretaciones siguen siendo distintas. La precisión exige decir qué cantidad se informa, no usar «95 por ciento» como si todos los métodos significaran lo mismo.

En qué punto estamos

El condicionamiento hace que la probabilidad responda a la información, pero también crea uno de sus fallos más comunes: invertir o cambiar silenciosamente la condición. La regla de Bayes muestra exactamente qué cantidades adicionales hacen falta. Aclarada esa estructura inferencial, la siguiente pregunta es física: cuando la probabilidad aparece en mecánica estadística o teoría cuántica, ¿qué parte refleja descripción incompleta y qué parte pertenece al propio marco predictivo?

3. Probabilidad en mecánica estadística

La mecánica estadística usa probabilidad porque los sistemas macroscópicos contienen cantidades enormes de grados de libertad microscópicos. En vez de seguir cada molécula, se trabaja con distribuciones sobre microestados o ensembles y se derivan cantidades macroscópicas mediante promedios. Jaynes subrayó que los métodos de máxima entropía pueden entenderse como inferencia bajo restricciones declaradas, no como la afirmación de que un gas recorra literalmente de forma ingenua todo estado concebible.[3]

La elección del ensemble forma parte, por tanto, del modelo. Las descripciones microcanónica, canónica y gran canónica corresponden a restricciones e intercambios distintos con el entorno. En límites termodinámicos apropiados suelen coincidir para propiedades volumétricas, pero sistemas finitos, interacciones de largo alcance y situaciones fuera del equilibrio pueden mostrar diferencias importantes. Aquí la probabilidad está ligada a coarse-graining, preparación e información macroscópica limitada.

Esto no convierte las regularidades termodinámicas en arbitrarias. Una vez fijados modelo, restricciones y leyes de interacción, las distribuciones de probabilidad producen predicciones

precisas sobre fluctuaciones, relaciones de equilibrio y transporte. La distinción es entre una distribución que resume muchos microestados y la afirmación de que la probabilidad sea un ingrediente material dentro del sistema. El éxito estadístico procede de la relación estructurada entre posibilidades microscópicas y observables macroscópicos.

En qué punto estamos

La mecánica estadística muestra cómo la probabilidad puede ser indispensable incluso cuando la microdinámica se trata como determinista: la distribución codifica restricciones, coarse-graining y especificación microscópica incompleta. Ese caso impide identificar sin más probabilidad con aleatoriedad fundamental. La teoría cuántica plantea una frontera más difícil, porque sus probabilidades permanecen en las reglas predictivas estándar incluso para preparaciones cuidadosamente controladas.

4. Probabilidad cuántica y la frontera de Bell

La teoría cuántica asigna probabilidades a resultados de medida mediante el estado cuántico y la medición realizada. Repetir lo que operacionalmente es la misma preparación produce distribuciones estadísticas estables, aunque en general no se prediga con certeza cada resultado individual. El formalismo coloca así la probabilidad directamente en la conexión entre preparación y resultados observados, no solo en la ignorancia de una trayectoria clásica descontrolada.

El teorema de Bell afina qué puede y qué no puede explicar esas estadísticas. Las desigualdades de Bell se satisfacen en una amplia clase de teorías locales de variables ocultas; la mecánica cuántica predice violaciones de ellas.[5] El resultado no demuestra que «todo sea aleatorio» ni selecciona una única interpretación de la mecánica cuántica. Excluye una conjunción concreta de supuestos usada para derivar las desigualdades.

La distinción importa. Las probabilidades cuánticas pueden interpretarse mediante marcos tipo Copenhague, muchos mundos, bohmianos, colapsos objetivos y otros, que discrepan sobre ontología mientras reproducen gran parte de la misma estructura probabilística de laboratorio. El núcleo restringido experimentalmente es el patrón de resultados y correlaciones. Las afirmaciones sobre qué es en último término la probabilidad pertenecen a una capa interpretativa que no debe presentarse como si un único experimento la hubiera resuelto.

En qué punto estamos

La teoría cuántica introduce la probabilidad en la regla operativa de predicción, mientras las desigualdades de Bell excluyen amplias explicaciones locales de variables ocultas para las correlaciones que predice la teoría cuántica. Ninguno de esos hechos convierte la probabilidad en sustancia ni resuelve toda disputa interpretativa. La frontera es precisa: los experimentos restringen distribuciones y correlaciones; la ontología requiere argumentos adicionales. La sección final vuelve al uso de probabilidades entre disciplinas sin borrar esas diferencias.

5. La probabilidad como herramienta, no como explicación por sí sola

Un modelo probabilístico puede estar perfectamente calculado y ser científicamente pobre si sus variables, clase de referencia o estructura causal son equivocadas. Asignar una probabilidad a lluvia, enfermedad, fallo o resultado de una partícula no explica el mecanismo que produce la

distribución. La probabilidad organiza predicciones condicionadas a un modelo; explicar exige estructura adicional sobre dinámica, causas, restricciones o medición.

Por eso importan la calibración y la comprobación del modelo. Si sucesos a los que se asigna probabilidad 0,7 ocurren muy lejos del 70 por ciento en un conjunto adecuado de predicciones comparables, el sistema de pronóstico está mal calibrado aunque no pueda etiquetarse de antemano cada caso individual como «equivocado». Del mismo modo, un posterior puede ser matemáticamente correcto respecto a un prior y una verosimilitud y, aun así, resultar científicamente engañoso si esos ingredientes representan mal el proceso que generó los datos.

Dentro de esta serie, IDE-017 trata la incertidumbre de forma más amplia, incluida la incertidumbre de medida y de modelo, mientras IDE-023 pregunta qué cuenta como observación e IDE-014 cómo la medición produce cantidades comparables. La probabilidad aporta el cálculo que conecta alternativas y evidencia; no sustituye esos conceptos vecinos. Esa frontera mantiene relacionadas dependencia estadística, incertidumbre, observación y azar físico sin colapsarlas en una sola palabra.

En qué punto estamos

La probabilidad es más fiable cuando el espacio de sucesos, el modelo y la interpretación se declaran juntos, junto con la información condicionante cuando corresponda. El cálculo se comparte entre muchas ciencias, mientras el significado físico de una probabilidad puede variar mucho entre aplicaciones. Eso no es un defecto sino una condición de frontera. La serie puede usar ahora la probabilidad como herramienta matemática controlada sin tratar incertidumbre, causalidad u observación como sinónimos.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- El cálculo estándar de probabilidad está restringido por axiomas o requisitos de coherencia que determinan cómo se combinan y condicionan probabilidades una vez fijada la estructura de sucesos.[1,2]
- La regla de Bayes requiere tasas base al invertir probabilidades condicionales; $P(A|B)$ no puede inferirse en general de $P(B|A)$ por sí sola.[2]
- La mecánica estadística usa distribuciones sobre microestados o ensembles para derivar predicciones macroscópicas bajo restricciones especificadas.[3]
- Las desigualdades de Bell restringen amplias clases de explicaciones locales de variables ocultas, y la teoría cuántica predice correlaciones que las violan.[5]

Lo que todavía no sabemos

- Qué interpretación de la probabilidad cuántica, si alguna, ofrece la mejor descripción ontológica detrás del formalismo predictivo compartido.
- Cómo representar de forma más eficaz la incertidumbre en sistemas complejos no estacionarios donde el espacio de sucesos relevante y la propia clase de modelos evolucionan.
- Cuándo las discrepancias entre modelos probabilísticos se entienden mejor como falta de datos, mala especificación del modelo o supuestos físicos genuinamente distintos.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Experimentos cuánticos repetibles y bien calibrados que mostraran desviaciones estadísticamente significativas de las probabilidades de la regla de Born tras excluir sistemáticos conocidos exigirían revisar el marco probabilístico cuántico estándar.
- Un modelo local de variables ocultas que reprodujera las correlaciones que predice la teoría cuántica manteniendo los supuestos usados para derivar la desigualdad derribaría la frontera que aquí se extrae del teorema de Bell.[5]
- Una regla de inferencia demostrada que recuperara $P(A|B)$ de forma única a partir de $P(B|A)$ para distribuciones arbitrarias sin usar priors ni información equivalente de tasa base contradiría la estructura de probabilidad condicional usada aquí.[2]

Si solo recuerdas una cosa

La probabilidad es un cálculo coherente para alternativas inciertas; el número solo significa algo con sus sucesos, condiciones, modelo e interpretación.

Artículos relacionados

- IDE-003 — Entropía
- IDE-017 — Incertidumbre
- IDE-023 — ¿Qué es una observación?

Referencias

[1] R. T. Cox. Probability, Frequency and Reasonable Expectation. American Journal of Physics 14, 1-13 (1946). DOI 10.1119/1.1990764.

[2] A. N. Kolmogorov. Foundations of the Theory of Probability, 2nd English ed. Chelsea Publishing (1956; original German edition 1933).

[3] E. T. Jaynes. Information Theory and Statistical Mechanics. Physical Review 106, 620-630 (1957). DOI 10.1103/PhysRev.106.620.

[4] Amos Tversky; Daniel Kahneman. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. Science 185(4157), 1124-1131 (1974). DOI 10.1126/science.185.4157.1124.

[5] John S. Bell. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. Physics Physique Fizika 1(3), 195-200 (1964). DOI 10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.