

Causalidad: intervención, contrafactuales e influencia física

IDE-004 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.7 ES · 17 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: Ciencia experimental, inferencia causal y propagación física

Límite: La causalidad se separa de correlación, predicción y mero orden temporal

Trabajos relacionados: IDE-005, IDE-010, IDE-023

Perfil epistémico: Conocimiento establecido

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

Las preguntas causales exigen más que comprobar si dos variables cambian juntas. Preguntan qué cambiaría bajo intervención, qué condiciones de fondo deben controlarse y qué explicaciones alternativas se han excluido. Los experimentos aleatorizados obtienen fuerza causal al modificar deliberadamente la asignación del tratamiento, mientras las ciencias observacionales dependen de supuestos más fuertes sobre estructura, confusión, tiempo y mecanismo.[1,2] La causalidad de Granger formaliza una asimetría predictiva en series temporales, pero predecir no equivale a intervenir.[3] La física añade otra frontera: la relatividad restringe por dónde pueden propagarse influencias en el espacio-tiempo, mientras el teorema de Bell excluye amplias clases de explicaciones locales con variables ocultas sin proporcionar un canal controlable de señalización superlumínica.[4-6] El artículo separa estos significados para que «causa» no se reduzca a correlación, cronología o predictibilidad. La asociación puede sugerir una pregunta causal, pero la conclusión requiere diseño o restricciones que descarten alternativas.

En 60 segundos

Supongamos que fumar y una enfermedad están correlacionados. La correlación no dice por sí sola qué ocurriría si se cambiara el tabaquismo manteniendo adecuadamente fijos los factores de fondo relevantes. Esa pregunta contrafactual o intervencionista es el núcleo de la inferencia causal moderna.[1,2] Los experimentos aleatorizados ayudan rompiendo vínculos sistemáticos entre asignación del tratamiento y muchos confusores potenciales. Cuando aleatorizar es imposible, grafos causales, experimentos naturales, variables instrumentales, información temporal y conocimiento mecanístico pueden a veces identificar efectos, pero solo bajo supuestos explícitos.[1] La prueba de Granger pregunta si el pasado de una serie mejora la predicción de otra más allá de su propio pasado; es útil, pero no demuestra por sí sola un mecanismo manipulable.[3] «A ocurrió antes que B» es aún más débil porque causas comunes, feedback y selección pueden producir secuencias engañosas.[1] En física, la relatividad

hace de la velocidad de la luz una velocidad límite, de modo que las influencias controlables no la superan.[4] Las correlaciones de Bell violan desigualdades de modelos locales con variables ocultas, pero la teoría cuántica estándar sigue prohibiendo señalización superlumínica controlable.[5,6] La causalidad no es, por tanto, un solo estadístico. Es una afirmación disciplinada ligada a intervenciones, estructura del modelo e influencia físicamente permitida.

Por qué importa esta pregunta

El lenguaje causal dirige decisiones: qué tratamiento funciona, qué política cambia el riesgo, qué mecanismo produjo un fallo y si un suceso físico puede influir en otro. Confundir correlación con causa puede recomendar intervenciones inútiles o dañinas; confundir predicción con causa puede hacer que un modelo de pronóstico parezca mecanístico; confundir correlación cuántica con señalización puede convertir un resultado preciso en ciencia ficción. La solución no es exigir experimentos aleatorizados para toda pregunta, sino declarar qué noción causal se usa, qué supuestos la identifican y qué observaciones revelarían confusión o una restricción física violada.

1. La asociación todavía no es un efecto causal

Una asociación estadística describe cómo covarían variables en una distribución observada. Un efecto causal pregunta cómo diferiría un resultado si se cambiara por intervención un tratamiento o entrada frente a una alternativa apropiada.[1,2] Son objetos distintos. Dos variables pueden asociarse con fuerza porque una causa a la otra, porque una tercera causa a ambas, porque la selección depende de ambas o porque el proceso generador contiene feedback.

El lenguaje contrafactual hace explícita la distinción. El marco de resultados potenciales de Rubin define efectos comparando resultados que ocurrirían bajo estados alternativos de tratamiento, aunque para una unidad solo observemos uno.[2] El marco estructural de Pearl expresa intervenciones modificando el modelo causal en vez de limitarse a condicionar un valor observado. [1] Los formalismos difieren en énfasis, pero coinciden en que la distribución conjunta por sí sola no resuelve la pregunta causal.

Incluso condicionar puede crear una asociación inexistente. Si dos causas independientes influyen en si un caso entra en una muestra seleccionada, restringir el análisis a ese grupo puede volverlas estadísticamente dependientes. Este sesgo de collider o selección muestra por qué «controlar por todo» no es una regla causal segura.[1] Las variables de ajuste deben elegirse desde una estructura causal, no desde la intensidad de correlación.

En qué punto estamos

La asociación revela patrones que merecen explicación, pero los efectos causales se refieren a intervenciones o contrastes contrafactuales que la distribución observacional no determina por sí sola. Confusión y selección pueden imitar dirección. El paso siguiente es metodológico: preguntar qué diseños y supuestos proporcionan fuerza suficiente para identificar un efecto causal en vez de redescubrir la misma correlación.

2. Los experimentos ganan fuerza mediante intervención

La asignación aleatoria es potente porque, en expectativa, hace el tratamiento independiente de características previas que podrían confundir la comparación. Las diferencias de resultados

pueden atribuirse a la intervención sujetas a límites de adherencia, medición, interferencia y muestreo.[2] La aleatorización no garantiza equilibrio perfecto en toda muestra finita ni responde automáticamente si el resultado generaliza fuera de la población estudiada.

La intervención también separa manipulación de observación. Ver que quienes eligen un tratamiento evolucionan mejor puede reflejar pronóstico, acceso o motivación; asignarlo mediante protocolo aleatorio cambia el proceso generador de datos. Pearl formaliza la diferencia con operadores de intervención y los resultados potenciales con contrastes entre resultados específicos de tratamiento.[1,2] Ambos obligan a decir qué acción se compara con qué alternativa.

Los experimentos no siempre son posibles o éticos. La astronomía no puede aleatorizar estrellas, la geología no puede repetir colisiones continentales y la epidemiología no puede asignar muchas exposiciones dañinas. La inferencia causal depende entonces de variación cuasialeatoria, experimentos naturales, variables instrumentales, controles negativos, conocimiento mecanístico y supuestos estructurales cuidadosamente defendidos.[1] La falta de aleatorización eleva la carga argumental; no vuelve inaccesible la causalidad.

En qué punto estamos

La intervención proporciona la forma empírica más limpia de una pregunta causal, pero mucha ciencia trabaja sin control experimental directo. En esos casos, la identificación proviene de supuestos que conectan observaciones con una estructura causal. La disciplina crucial consiste en hacer esos supuestos suficientemente visibles para poder atacarlos. Eso abre el problema observacional: distinguir vías causales de confusión mediante grafos, ajustes y diseños alternativos.

3. La causalidad observacional depende de estructura

Los diagramas causales codifican hipótesis sobre qué variables influyen directamente en cuáles. Su valor no es decorativo: criterios gráficos de separación pueden indicar qué variables ajustar, cuáles no condicionar y cuándo un efecto no es identificable desde la distribución observacional disponible.[1] Un grafo combina por tanto información empírica con supuestos que no vienen incluidos en los coeficientes de correlación.

Las causas comunes son los confusores clásicos. Si condiciones socioeconómicas influyen tanto en una exposición como en un resultado, puede persistir una asociación sin efecto causal directo. Pero ajustar tampoco siempre ayuda. Condicionar mediadores puede eliminar parte del efecto que queremos estimar; condicionar colliders puede introducir sesgo.[1] El análisis causal trata del papel de una variable en el proceso generador hipotético, no de si su p-valor es pequeño.

Experimentos naturales y variables instrumentales explotan situaciones donde algún factor desplaza el tratamiento y, bajo supuestos declarados, afecta al resultado solo a través de él. Estos diseños pueden ser potentes, pero sus supuestos de identificación son sustantivos y a menudo no comprobables únicamente con los datos observados.[1] Los análisis de sensibilidad, la replicación entre contextos y la coherencia mecanística ayudan porque obligan a que modos de fallo distintos conspiran para producir el mismo resultado causal aparente.

En qué punto estamos

La inferencia causal observacional es posible cuando la estructura aporta información que la asociación bruta no contiene. Grafos y cuasiexperimentos no eliminan supuestos; los organizan para que ajustes, identificación y fallos sean explícitos. Una fuente importante de estructura adicional es el tiempo, pero el orden temporal tiene su propia trampa: predecir desde el pasado puede ser evidencia útil sin convertirse en causalidad intervencionista.

4. El tiempo ayuda, pero predecir no es intervenir

En intervenciones ordinarias hacia delante, las causas no ocurren después de sus efectos, de modo que la información temporal restringe muchas hipótesis. Pero «A fue primero» no basta. Ciclos estacionales pueden impulsar A y B, un proceso latente puede producir respuestas retrasadas en ambos y el feedback puede hacer que cada variable informe sobre el futuro de la otra.[1] La precedencia temporal estrecha posibilidades sin seleccionar un mecanismo único.

La causalidad de Granger es deliberadamente predictiva. En su forma clásica, X causa a Y en sentido de Granger cuando el pasado de X mejora la predicción de Y más allá de la información contenida en el pasado de Y, bajo el modelo y conjunto de información elegidos.[3] Puede revelar dependencia direccional y es valiosa en economía, neurociencia y otros datos secuenciales. Pero causas comunes omitidas, retrasos de medición y mala especificación pueden crear o borrar relaciones de Granger.

La distinción es constructiva y no desestimatoria. La asimetría predictiva puede ser una pieza de evidencia causal cuando se integra en un diseño o modelo estructural que trate confusión y medición. Se vuelve engañosa solo cuando la palabra «causalidad» de la etiqueta técnica se toma como prueba de respuesta a una intervención. Un pronóstico puede funcionar por razones que desaparecerían si el predictor se manipulara físicamente.

En qué punto estamos

El tiempo ordena influencias candidatas y la asimetría predictiva puede revelar estructura direccional útil, pero ni cronología ni predictibilidad de Granger identifican por sí solas un efecto de intervención. La causalidad sigue dependiendo del modelo de qué pudo producir las observaciones. La física añade una frontera externa más aguda: la geometría del espacio-tiempo restringe qué sucesos pueden influirse incluso antes de elegir un modelo causal estadístico.

5. La causalidad física tiene una frontera espacio-temporal

La relatividad especial hace de la velocidad de la luz una velocidad límite: componer dos velocidades inferiores a ella da siempre una velocidad inferior a ella, y las velocidades mayores no tienen posibilidad de existencia.[4] Minkowski lo reformuló como geometría. En cada punto del universo un cono de luz separa los sucesos que envían luz hacia él de los que reciben luz de él, y un punto situado entre los dos conos puede considerarse, según el sistema de referencia elegido, anterior, simultáneo o posterior al vértice.[7] Este artículo llama a esa región separada espacialmente, y como esa velocidad límite se cumple,[4] ninguna influencia controlable la atraviesa. Esto va más allá de decir que las causas preceden a efectos: Einstein ya mostró que dos sucesos simultáneos en un sistema de coordenadas no tienen por qué serlo vistos desde otro en

movimiento relativo,[4] de modo que el orden causal debe ligarse a la estructura invariante del espacio-tiempo.

El teorema de Bell aporta otra lección. Bell formuló matemáticamente la idea de variables ocultas locales y mostró que es incompatible con las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica, por lo que las correlaciones no se explican asignando variables locales preexistentes del modo clásico que él limitó.[5] Su artículo propuso el experimento decisivo en lugar de informar de uno. Pero la no localidad de Bell no es un teléfono operacional superlumínico. La teoría cuántica estándar conserva no señalización: las elecciones en un ala no permiten controlar los resultados marginales observados en otra ala separada espacialmente de ella.[6,7]

Ambas afirmaciones son compatibles porque «causalidad local», dependencia estadística y señalización controlable no son conceptos idénticos. La física refuerza así la regla metodológica general del artículo: definir la afirmación causal antes de probarla. IDE-005 pasa a simetría y pregunta qué permanece invariante bajo transformación en vez de qué cambia qué. Ese traspaso es editorial y no constituye evidencia para ninguna afirmación de esta sección.

En qué punto estamos

La causalidad abarca contrastes de intervención, identificación estructural en datos observacionales e influencia físicamente permitida en el espacio-tiempo. La disciplina común es excluir alternativas bajo supuestos explícitos. Correlación, precedencia temporal, predictibilidad de Granger y correlación de Bell aportan información, pero ninguna puede rebautizarse sin más como «causa». El concepto conserva su utilidad precisamente porque su significado operacional se fija antes de interpretar la evidencia.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Intervenciones aleatorizadas y bien diseñadas pueden identificar efectos causales modificando la asignación del tratamiento en vez de limitarse a observar exposición.[1,2]
- La asociación observada por sí sola no identifica dirección causal porque confusión, selección y feedback pueden producir el mismo patrón estadístico.[1]
- La causalidad de Granger es una relación predictiva en series temporales y no equivale a causalidad intervencionista.[3]
- La relatividad especial hace de la velocidad de la luz una velocidad límite, de modo que la propagación causal controlable no la supera.[4]
- Las correlaciones de Bell excluyen amplias explicaciones locales con variables ocultas mientras la teoría cuántica estándar mantiene no señalización operacional.[5,6]

Lo que todavía no sabemos

- Cómo identificar muchos efectos causales en sistemas biológicos, sociales y ecológicos complejos cuando intervenir es imposible y la confusión latente solo se mide parcialmente.
- Qué abstracciones causales permanecen estables cuando las propias variables cambian de significado entre escalas, contextos o regímenes de medida.
- Cómo integrar mejor modelos mecanísticos, predictores de aprendizaje automático e identificación causal formal sin permitir que el rendimiento predictivo sustituya la validez causal.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Una intervención aleatorizada que produjera repetidamente ausencia de cambio donde un modelo causal bien especificado predice un efecto grande, con adherencia y medición verificadas, obligaría a revisar el modelo y no la mera correlación observada.[1,2]
- Un método temporal que recuperara de forma única efectos de intervención en sistemas con causas comunes ocultas arbitrarias usando solo orden predictivo derribaría la distinción actual entre predicción de Granger e identificación causal.[1,3]
- Un protocolo reproducible que usara correlaciones de Bell para transmitir un mensaje elegido libremente fuera del cono de luz contradiría la no señalización estándar y exigiría revisar profundamente la física cuántica relativista.[4-7]

Si solo recuerdas una cosa

Una afirmación causal dice qué cambiaría bajo una intervención definida o una influencia físicamente permitida; correlación, cronología y predicción son evidencia, no sustitutos.

Artículos relacionados

- IDE-005 — Simetría
- IDE-010 — Retroalimentación
- IDE-023 — ¿Qué es observación?

Referencias

- [1] Judea Pearl. Causality: Models, Reasoning, and Inference, 2nd ed. Cambridge University Press (2009).
- [2] Donald B. Rubin. Estimating Causal Effects of Treatments in Randomized and Nonrandomized Studies. Journal of Educational Psychology 66(5), 688-701 (1974). DOI 10.1037/h0037350.
- [3] C. W. J. Granger. Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. Econometrica 37, 424-438 (1969). DOI 10.2307/1912791.
- [4] Albert Einstein. On the Electrodynamics of Moving Bodies. Annalen der Physik 17, 891-921 (1905). DOI 10.1002/andp.19053221004.
- [5] John S. Bell. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. Physics Physique Fizika 1(3), 195-200 (1964). DOI 10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195.
- [6] Tim Maudlin. Quantum Non-Locality and Relativity, 3rd ed. Wiley-Blackwell (2011).
- [7] Hermann Minkowski. Raum und Zeit. Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 18, 75-88 (1909); address delivered at Cologne on 21 September 1908.