

Extract of Viento Sur

<https://vientosur.info/spip.php?article12686>

Ciencia

Sobre el azar

- solo en la web -

HUBERT KRIVINE
**Petit traité de
hasardologie**

Publication date: Sábado 10 de junio de 2017

*Préface de Guillaume Lecoq
Illustrations de Nicolas Pavloff*



Description:

El contenido de este artículo, después de varias consideraciones sobre el uso y el mal uso de las probabilidades, trata del empleo de la palabra "azar"

Licencia de Creative Commons BY - NC- ND Viento Sur

El contenido de este artículo se ha extraído *grosso modo* de un libro modestamente titulado *Petit traité de hasardologie* [1/](#) (Pequeño tratado de azarología). Después de varias consideraciones sobre el uso y -sobre todo- el mal uso de las probabilidades, trata del empleo de la palabra "azar".

Sobre el azar en física y otros ámbitos

Por dos razones (al menos), la física es una disciplina más fácil que las demás: en general es posible 1) considerar los objetos del laboratorio al margen de su historia, y 2) controlar su dependencia del entorno. Es cierto que la mayoría de los átomos no llegaron a existir más que 300 000 años después del Big Bang y que han podido transformarse por radioactividad, pero su naturaleza no ha cambiado: los átomos de oxígeno 16 (o los electrones) son lo que eran hace 4 000 millones de años y, sobre todo, son todos absolutamente idénticos entre sí. Además, a menudo se puede considerar (no en física cuántica) el sistema estudiado aisladamente del resto del mundo, y cuando no es este el caso, cuantificar simplemente sus intercambios con el exterior; por ejemplo, los intercambios de energía se miden por la temperatura.

Sin hablar siquiera de las ciencias sociales, en biología esta compartimentación es más difícil: las especies, al reaccionar con su medio, cambian permanentemente, por mucho que el nombre que les atribuyamos parezca fijarlas: el perro fue primero un lobo; el *homo sapiens*, *homo erectus*; el trigo actual no tiene más que un lejano parentesco con el trigo salvaje, etc. En fin, los debates sobre los organismos genéticamente modificados (OGM) ilustran muy bien la dificultad que entraña tener en cuenta las interacciones con el entorno. A esto hay que añadir todavía, por tanto, el problema del tiempo de observación pertinente. Tal vez habría que tener en cuenta una tercera razón: la función de las matemáticas como elemento de previsión. Es la famosa "irrazonable eficacia de las matemáticas", según Wigner.

Sobre la legitimidad del azar en general

Según Laplace, los antiguos evocaban el azar por ignorancia de las "causas verdaderas", lo que viene a decir que la "sana filosofía" debía eliminarlo. Este pronóstico es discutible. En primer lugar, la invocación del azar por los antiguos no era tan común [2/](#), pero, sobre todo, en cierto sentido, las ciencias modernas utilizan el azar como elemento constitutivo de buena parte de nuestra comprensión de la naturaleza; pensemos en las ciencias de la vida, en la física estadística o en la mecánica cuántica.

El azar materialista tiene sus cartas de nobleza. Para Epicuro (siglo III a.C.), heredero y continuador de los atomistas griegos, la naturaleza se compone de átomos y vacío. Hace mucho tiempo, los átomos caían [3/](#) en un movimiento uniforme y paralelamente unos a otros. En un momento dado, uno de ellos, por casualidad, se desvió ligeramente y chocó con los demás. Es el *clinamen* que el filósofo romano Lucrecio describe en el libro II de *De rerum natura*:

"Los átomos descienden en línea recta en el vacío, impulsados por su propio peso; pero sucede, sin que se sepa dónde ni cuándo, que se desvían un poco de la vertical, tan poco que apenas podemos hablar de declinación. Sin esta desviación, todos ellos, como las gotas de lluvia, no dejarían de caer a través del vacío inmenso; no habría lugar a encuentros, a choques, y jamás la naturaleza habría podido crear nada."

Seguidamente, por efecto de los "átomos corvos", un fenómeno de bola de nieve creará los diversos cuerpos, cuyas propiedades (lisas o rugosas, por ejemplo) dependen de la naturaleza de los átomos (redondos o puntiagudos). Sin embargo, sería azaroso ver en ello un presentimiento de la concepción moderna de la función del azar y de las fluctuaciones en la física moderna.

Durante la Ilustración, la ciencia se desarrolló en contra del azar, identificado con la ignorancia o la complejidad de las causas de los fenómenos; la ciencia ya pondría las cosas en su sitio. Las "leyes de la naturaleza" no eran probabilistas, por mucho que, debido a la limitación de sus medios, los sabios debieran recurrir a las probabilidades. Actualmente, en aras a la prudencia, seríamos menos categóricos con respecto al origen de las probabilidades como resultado exclusivo de las limitaciones humanas y preferiríamos hablar de las "leyes de la física". Aunque desde el punto de vista etimológico es lo mismo [4/](#), las leyes de la naturaleza están teñidas de antropomorfismo: la naturaleza, como los humanos, dictando leyes a las que hay que obedecer, como si hubiera un ordenamiento preestablecido.

1. ¿El azar contra la ciencia?

Si todo es tan solo más o menos probable, ¿existen verdades en la ciencia? Señalemos, para empezar, que si no las hay en ella, probablemente no las haya tampoco en ninguna otra parte, a excepción, por supuesto, de las verdades reveladas. Por tanto, habría que desterrar la palabra misma, ya que no podría utilizarse en ningún caso. No compartimos esta posición extremista, que de hecho nadie comparte en la práctica: es difícil imaginar cómo podríamos renunciar, en la vida cotidiana, a diferenciar entre lo verdadero y lo falso. Es curioso ver que cuando hacen filosofía, ciertos pensadores se sitúan a años luz de los modos de razonamiento que, no obstante, se ven obligados a practicar todos los días.

No es cuestión de retomar aquí la abundante literatura consagrada a este espinoso tema. Nos limitaremos, más modestamente, a decir que todas las teorías científicas tienen elementos verdaderos, [5/](#) es decir, elementos robustos desde el punto de vista de la experiencia y de su coherencia interna. Y que al mismo tiempo toda teoría posee ámbitos de aplicación que el progreso amplía o reduce, lo que le permite evolucionar.

1.1 ¿Y las matemáticas?

No cabe duda que las matemáticas hay que considerarlas aparte. Es cierto que se utilizan matemáticas en el estudio del azar: se trata de la teoría de las probabilidades, una rama muy desarrollada, asociada a la teoría de la integración. En principio no hay reciprocidad, es decir, introducción del azar en las matemáticas: una proposición, una vez demostrada, es necesariamente verdadera, por definición. Si no lo es, se trata a lo sumo de una conjetura que solo cabe pensar "probablemente" verdadera. Pero no existe un teorema verdadero [6/](#) al 99 %.

El estudio de los números primos es instructivo. Muestra 1) que unos resultados que parecen muy verosímiles pueden ser falsos, y 2) que puede haber demostraciones de verosimilitud de resultados.

1) Los números primos (2, 3, 5, 7, 11...) son números que no tienen más divisores que el 1 y ellos mismos. Antaño considerado un pasatiempo gratuito de los matemáticos, su estudio tiene actualmente una importancia decisiva, en particular con respecto a los problemas de criptología para gente tan seria como los banqueros y los militares.

Su distribución parece aleatoria: a veces agrupados, a veces espaciados, en promedio son cada vez más raros, pese a que es fácil demostrar que su número es infinito; más exactamente, la proporción de números primos entre los números enteros inferiores a n tiende a 0 como $1/\log(n)$. Durante mucho tiempo se creyó disponer de un mayorante para la cantidad de números primos inferiores a n . Los cálculos numéricos realizados hasta $n = 1020$ parecían confirmar esta conjetura. Sin embargo, se ha demostrado que al menos por encima de $n = 1,39822 \times 10316$, esta mayoración es errónea. Es un buen ejemplo de conjetura "probablemente" verdadera de la que hoy se sabe que es indudablemente falsa, aunque a menudo utilizable en la práctica: ¿cuándo se emplean números enteros mayores que 1020?

2) Más allá de la fuerza bruta (probando con los sucesivos divisores), que es un procedimiento extremadamente largo, prácticamente irrealizable incluso con ayuda de ordenadores, para un número de doscientas cifras, existen pruebas de primalidad más sofisticadas que permiten analizar números de varios miles de cifras. Sin embargo -y este es un problema diferente- no proporcionan la descomposición en factores primos, lo cual es un problema mucho más interesante, aunque mucho más difícil. En efecto, la seguridad de las tarjetas bancarias se basa en el hecho de que, si bien es relativamente sencillo multiplicar dos enormes números primos, no se conoce ningún método determinista capaz de recuperar en un tiempo razonable esos dos números partiendo únicamente de su producto. Si se pudiera mostrar uno, probabilista, que permitiera este milagro, aunque fuera con una tasa de fracaso del 99 %, correría peligro todo el comercio mundial: pensemos qué supondría el desvío de tan solo el 1 % de los miles de millones de transacciones.

1.2 Incertidumbres y probabilidades

Hay que distinguir entre incertidumbre y probabilidad (que es la eventual medida de aquella): que un acontecimiento sea incierto no quiere decir que se sepa (¿que se pueda?) atribuirle una probabilidad. Por ejemplo, no sabíamos (en octubre de 2014) si Francia conocería la fiebre del Ébola. Pero ¿qué sentido tiene la "predicción" leída en la prensa de que hay un 75 % de "probabilidades" de que se vea afectada? Menos arbitraria parece la predicción meteorológica cuando anuncia una probabilidad de lluvia del 25 %; con ello se quiere decir que, ejecutando varias veces el mismo programa informático determinista, pero con unas condiciones de partida ligeramente diferentes, resulta lluvia en una cuarta parte de los casos.

Tal vez haya cuatro tipos de incertidumbre, algunos cuantificables por las probabilidades, otros no. Podemos enumerar:

- La incertidumbre asociada a la precisión -siempre finita- de las mediciones, precisión que en principio se puede mejorar multiplicándolas. Sin embargo, si bien experiencias modernas como las que condujeron a la demostración del bosón de Higgs (con una certeza del 99,999 % según sus descubridores) son, en principio, repetibles, no se repetirán con tanta facilidad debido a la enormidad de los medios que movilizan. Lo mismo ocurre con la demostración de las

ondas gravitacionales.

- La incertidumbre contenida en las propias teorías físicas; puede ser más o menos controlable, como la que resulta de la teoría del caos o de la ley de los grandes números. En un fenómeno caótico, es posible, si se precisan (mucho) las condiciones iniciales, mejorar (un poco) el horizonte de las previsiones; de ahí, por ejemplo, la importancia de una red más tupida de estaciones meteorológicas. En cuanto a la ley de los grandes números, permite afirmar, por ejemplo, que hay prácticamente el mismo número de moléculas de gas en las dos mitades del recipiente que las contiene. ¿Es cierto esto? Es una ley probabilista: con unas pocas moléculas se incumple, pero con un número razonable de (1020) deviene lo que tenemos derecho a calificar de "exacta", aunque matemáticamente no sea más que una probabilidad. El recuadro siguiente cuantifica, en un ejemplo simple, lo que podríamos llamar "tendencia a la certeza".

Distribución de las moléculas de un gas

Supongamos una distribución "aleatoria" de n moléculas de gas en un recinto. Si solamente hay una única molécula, la probabilidad de que se encuentre en la mitad derecha del recinto es de $1/2$. Con dos moléculas ($n = 2$), y dejando de lado las interacciones de las moléculas entre ellas, la probabilidad de hallar ambas moléculas en el lado derecho es de $1/2 \times 1/2 = 1/4$, pues se trata de probabilidades independientes. Con $n = 3$, la probabilidad de hallar las tres moléculas en el lado derecho es de $1/2 \times 1/2 \times 1/2 = (1/2)^3 = 1/8$. El cuadro siguiente muestra cómo la probabilidad de hallar todas las moléculas en el lado derecho tiende rápidamente a 0 cuando el número de moléculas n aumenta (tiende a 0 como $1/2^n$).

n Probabilidad (en %)

2 25

10 0,1

20 0,0001

40 10⁻¹⁰

100 10⁻²⁸

He aquí un ejemplo típico de una situación "matemáticamente" posible en que todas las moléculas se hallan en la mitad derecha del recipiente, pero que está totalmente descartada: habría que esperar periodos superiores a miles de millones de miles de millones de veces la edad del universo para ver que las moléculas de un gas se juntan espontáneamente en una mitad del recipiente. Del mismo modo, jamás veremos una gota de tinta disuelta en agua aglutinarse de nuevo para volver a formar la gota inicial.

- La incertidumbre puede ser irreductible, como enseña la mecánica cuántica. Incertidumbre que no impide hacer previsiones de medida con un margen de error del orden de un cabello en la distancia entre París y Nueva York.

- En fin, la incertidumbre puede estar asociada a la propia robustez de la teoría o del modelo. Por ejemplo, ¿qué

grado de confianza podemos otorgar a los modelos cosmológicos? ¿Qué sentido tiene la edad del universo? Y más prudentemente, ¿la del Big Bang y, con mayor razón, su evaluación en 13 700 millones de años? En comparación, la edad de la Tierra cifrada en 4 600 millones de años es mucho más cierta.

1.3 Sobre la causalidad

Si la desaparición insignificante de un electrón en los confines del universo, por un efecto de cascada evidentemente incontrolable, puede cambiar la trayectoria de las moléculas de la atmósfera y, a su vez, alterar la formación de ciclones, se comprende cómo esta desproporción total entre las causas y los efectos permitiría rehabilitar la noción del azar incluso en cadenas de acontecimientos lógicamente asociadas. Pero sobre todo existen muchos otros acontecimientos insignificantes capaces también de alterar los ciclones, como el aleteo de una mariposa [7](#).

El caos determinista o el "efecto mariposa"

Edward Norton Lorenz (1917-2008) había modelizado las circulaciones de las corrientes de aire con un simple sistema de ecuaciones a resolver en el ordenador. Los cálculos se hacían por duplicado para mayor seguridad. Al querer rehacer un cálculo que se había interrumpido, reinicializó su sistema con unas condiciones iniciales (que le parecían) muy similares y constató una divergencia creciente con el cálculo no interrumpido. Su gran mérito es que no descartó esta "discordancia", sino que se empeñó en comprenderla. En 1972 publicó su célebre artículo *Predictibilidad, El aleteo de una mariposa en Brasil ¿provoca un tornado en Texas?*, popularizando así el "efecto mariposa". Está claro que, si este es el caso, ya podemos decir adiós a la previsión meteorológica a largo plazo: aparte de los millones de mariposas, libélulas y aves que pululan en el cielo, ¿cómo conocer con la suficiente precisión el entorno y las condiciones iniciales? Es cierto que la red cada vez más tupida de estaciones de observación meteorológica permite afinar el conocimiento, y por tanto ganar algunos días, pero a precios que divergen.

¡Imposible por tanto saber qué hace qué! ¿Debemos renunciar por tanto a comprender la formación de los ciclones? Por supuesto que no, pero no a partir de los choques de moléculas entre ellas. Hay que situarse en el nivel adecuado, el de la termodinámica y de la circulación de las corrientes atmosféricas. Allí se puede hablar razonablemente de causas y efectos.

La cuestión de las temperaturas del futuro ilustra muy bien este desacoplamiento. A corto plazo, la meteorología

puede hacer previsiones a varios días vista, no más allá, debido al caos. Las previsiones que podemos hacer para todo el año (invierno frío, verano caluroso, en todo caso para el hemisferio norte) no son una prolongación de los cálculos de los meteorólogos, sino que parten de consideraciones sobre la exposición al Sol de las distintas zonas de la Tierra. En fin, las proyecciones a decenas de años vista son obra de los climatólogos; tampoco son la prolongación de los análisis estacionales (y menos todavía de los análisis de los meteorólogos).

Del mismo modo, puesto que el movimiento de los planetas es caótico, ¿debemos renunciar a describirlo?

El movimiento de los planetas es caótico

Este resultado puede parecer extraño: ¿cómo es posible que el movimiento de los astros (y en particular el de la Tierra) sea impredecible cuando sirve desde hace mucho para medir el tiempo? Tranquiliémonos: es predecible a escalas de tiempo "razonables", del orden de decenas de millones de años, pero dentro de algunos miles de millones de años nadie puede saber dónde estará la Tierra (si es que todavía existe). En efecto, en periodos "cortos" (a escala cosmológica) se pueden despreciar las interacciones debidas a los demás planetas, o en todo caso introducirlas como pequeñas perturbaciones en las ecuaciones de Newton que preveían la estabilidad del sistema. Pero en periodos largos, los cálculos divergen. Jacques Laskar ha calculado que un error de 15 metros en la posición de la Tierra comportaría un error de 150 millones de kilómetros al cabo de 100 millones de años.

Por supuesto que no: una vez más, a escala de decenas de millones de años (escala totalmente suficiente para las actividades prácticas humanas), las previsiones de la mecánica celeste no tienen nada de aleatorio; incluso han sido con razón el emblema de los éxitos de la ciencia y siguen siéndolo: pensemos en el "milagro" de la sonda Philae depositada a algunas decenas de metros del lugar elegido en el cometa Churyumov-Gerasimenko después de recorrer ¡10 000 millones de kilómetros!

Todas las teorías tienen ámbitos de validez, y estos ámbitos están definidos en el tiempo y en el espacio. Lo que puede ser impredecible a escala de miles de millones de años, como el movimiento de los planetas, está regulado como un reloj en periodos "humanos". Del mismo modo, el azar puede aparecer a nivel microscópico con el caos molecular, pero desaparece en las dimensiones macroscópicas con las leyes de la termodinámica.

Esto es lo que se denomina el fenómeno de *emergencia*, o cómo una propiedad macroscópica visible puede surgir de un azar microscópico invisible. Tenemos el ejemplo de la formación de cristales de hielo (es decir, una estructura muy ordenada) a partir de agua líquida (donde las moléculas circulan en todos los sentidos). El título de un famoso artículo de Anderson, *More is different*, resume bien este proceso, aunque habría que añadir que el *more* no se refiere únicamente a la cantidad de elementos (átomos, iones, moléculas, células), sino también a la duración.

En otras palabras, haciendo zoom sobre el tiempo y sobre el espacio [8/](#) podemos variar el azar, es decir, nuestra incapacidad de explicar o de prever. Nos encontramos aquí de nuevo con la idea banal de los niveles *ad hoc* de explicación.

La afirmación de que no hay efecto sin causa [9/](#) se presenta a menudo como la quintaesencia del método científico. En otros términos, el azar, considerado como efecto sin causa, no debería tener derecho de ciudadanía científica. Esta afirmación es un poco tautológica: por definición, un efecto siempre lo es de una causa y la causa siempre lo es de un efecto. Más vale decir que la ciencia trata de explicar los acontecimientos siguiendo sus propias modalidades. Y esto, como hemos mostrado, no excluye el azar. En todo caso, un azar controlado.

2. El azar en los descubrimientos

El azar, la impredecibilidad en el desarrollo de las ciencias, se sitúa en dos niveles. El más banal es el descubrimiento inesperado, un poco como un navegante que descubre una isla virgen que no figura en ningún mapa. Como ejemplos famosos citemos [10/](#), aleatoriamente, los satélites de Júpiter (Galileo en 1610); las relaciones entre el magnetismo y la electricidad (Rrsted en 1820); la penicilina (Fleming en 1928); la radioactividad (Becquerel en 1896).

Aparentemente, en el polo opuesto se situaría la verificación experimental u observacional de previsiones teóricas; de todos modos, difícilmente se puede afirmar que el descubrimiento de Neptuno en 1846 por Galle (gracias a los cálculos de Le Verrier) y los muy recientes del bosón de Higgs (2012) o de las ondas gravitacionales (2016) se han debido al azar: literalmente miles de científicos han estado trabajando en estas dos últimas investigaciones durante decenios, engullendo miles de millones de dólares.

De hecho, esta separación entre lo imprevisto y lo esperado no es tan nítida: la vasta cultura de sabios como Galileo, Rrsted, Fleming o Becquerel hizo que estuvieran preparados para aprovechar estos "azares"; por otro lado, Le Verrier había hecho un uso feliz de una hipótesis no justificada (la ley de Titus-Bode) y Galle había apuntado su anteojo un poco apartado de la dirección indicada; los descubridores de las ondas gravitacionales tuvieron la suerte de toparse en el momento adecuado y con el ángulo de visión correcto con un acontecimiento relativamente excepcional: ¡la coalescencia de dos agujeros negros!

Lo verdaderamente inesperado viene después: serán las consecuencias totalmente impredecibles de estos descubrimientos.

¿Se puede comparar el desarrollo ramificado de la ciencia con la evolución darwiniana? Aparentemente no: el primero supone una voluntad e intenciones, la segunda seguramente no, a menos que creamos en el diseño inteligente. Además, un ingrediente motor esencial de la evolución es la reproducción -reproducción que no crea ni mucho menos una copia idéntica-. Existe, sin embargo, una similitud: la naturaleza, como la investigación, produce toda clase de ramas -probablemente la mayoría- que *a posteriori* resultarán estériles, pero cuya existencia ha sido el vivero necesario para su evolución. La idea de que la investigación científica pudiera orientarse de modo sistemático hacia un fin determinado, eliminando *a priori* lo que pareciera una rama muerta, es esterilizante. No se ha descubierto el láser tratando de mejorar la vela ni el GPS perfeccionando la brújula.

Ya lo anunciamos antes: la azarología no existe. En todo caso, no hemos sabido hallar una definición del azar que sea general y convincente. La definición de Cournot -encuentro de dos cadenas causales independientes- puede parecer a menudo la más útil, pero deja de lado dos "azares" importantes, el del caos determinista y el de la física cuántica. Cosa que no es ni mucho menos marginal.

¿No podríamos definir más modestamente un azar "local", propio de cada disciplina? Correspondería a cada una de ellas definir "su" azar en función del marco y de las fronteras inevitables de su investigación. Se trata en cierto modo de un "azar efectivo" que refleja la interacción del sistema estudiado con su entorno. Es una manera de relacionar un nivel de estudio con un nivel subyacente cuyos detalles no se desea (no se puede) conocer, dejando en manos de otros, filósofos o científicos, la tarea eventual de ir más lejos. Este nivel subyacente puede ser más microscópico, como en la teoría de los gases, pero no necesariamente: en la teoría de la evolución, puede combinar estudios de biología molecular con los del clima.

A modo de conclusión

Contrariamente a una creencia extendida, pero falsa, el desarrollo de las ciencias modernas más bien ha rehabilitado la noción del azar, como atestiguan la física estadística, la teoría del caos, la física cuántica y tal vez sobre todo la biología. Con ello desmonta la idea de que, si todo acontecimiento ha de tener una causa, identificada o no, el azar no sería más que el fruto de nuestra ignorancia.

Hemos tenido la prudencia de no decir nada del azar (o de la impredecibilidad) en política o en economía. Es una banalidad pensar que debe venir causado al mismo tiempo por la enorme complejidad de los fenómenos, por las incertidumbres de las teorías, si existen, y tal vez incluso, en este caso, por sensibilidades caóticas.

Traducción: **viento** sur

Notas:

[1/](#) Posfacio de Gillaume Lecointre, Ed. Cassini, 2016.

[2/](#) Las responsables eran más bien las voluntades de las divinidades.

[3/](#) Entre paréntesis, ¿qué sentido tiene la palabra "caer" cuando todavía no existe nada?

[4/](#) La palabra griega *physos*, de la que se deriva física, significa "naturaleza".

[5/](#) O si se desea parecer menos ingenuo, probablemente verdadero, incluso muy probablemente verdadero, por no decir cierto.

[6/](#) Ciertas demostraciones de teoremas pueden abarcar varios cientos de páginas y, por tanto, posibles errores. Actualmente, los ordenadores permiten un control formal de algunas de estas demostraciones, es decir, comprobar que no contengan errores.

[7/](#) Mencionemos un artículo muy gracioso, publicado en *Annals of improbable research*, que ¡ubica en Lausana la mariposa responsable de un tornado en París!

[8/](#) Puesto que la mecánica cuántica no es una teoría local (permite interacciones instantáneas a cualquier distancia), la noción de zoom ha de manejarse con prudencia.

[9/](#) Habría que añadir al menos sin causa *racional*, es decir, descartando la magia y las voluntades divinas, que son, por desgracia, causas perfectamente admisibles para buena parte de la humanidad.

[10/](#) En *De l'atome imaginé à l'atome découvert, contre le relativisme* (De Boeck, 2015), presentamos una lista -parcial- de estos grandes descubrimientos debidos a lo que los sabios denominan "serendipia".