

Preguntas sencillas, respuestas profundas

Edición para público general

Juan Segurola

El universo y sus observadores

Todos los derechos reservados

Cómo leer este libro

Estas cuarenta y ocho preguntas parten de observaciones familiares y siguen el razonamiento que hace convincente una explicación. Cada capítulo cuenta su propia historia con palabras, separando lo que se observó, cómo se puso a prueba y qué sigue siendo incierto. El objetivo es hacer accesible la evidencia sin presentar un modelo como una descripción completa de la naturaleza ni una interpretación como una medición directa.

Las narraciones principales pueden leerse por sí solas. Las notas técnicas opcionales que siguen a determinados capítulos desarrollan los cálculos, las demostraciones o los modelos cuantitativos, incluidos sus supuestos y límites. La numeración de las referencias empieza de nuevo en cada capítulo y es compartida por su narración y sus notas. Los números ilustrativos se distinguen de las mediciones. El material sirve para comprender, no para tomar decisiones médicas ni realizar experimentos peligrosos.

Índice

¿Por qué el metal se siente más frío que la madera?	3
¿Por qué flota el hielo?	6
¿Por qué el cielo es azul de día?	8
¿Pueden dos personas ver el mismo arcoíris?	10
¿Por qué el rozamiento puede frenarnos y ayudarnos a caminar?	12
¿Por qué el jabón ayuda a eliminar la grasa?	15
¿Por qué podemos ver a través del vidrio, pero no del metal?	17
¿Por qué se agota una batería?	20
¿Por qué un imán atrae algunos metales y otros no?	23
¿Por qué la Luna no cae sobre la Tierra?	25
¿Por qué suele haber dos pleamares al día?	27
¿Por qué el verano no se debe a estar más cerca del Sol?	29
¿Por qué la Luna nos muestra casi siempre la misma cara?	31
¿Cómo puede una nube mantenerse en el aire?	32
¿Por qué los rayos siguen trayectorias ramificadas?	34
¿Por qué el océano es salado y la lluvia no?	36
¿Por qué se encuentran fósiles marinos en lo alto de las montañas?	38
¿Por qué es tan difícil predecir un terremoto?	39
¿Cómo podemos estimar el clima futuro sin conocer el tiempo de cada día?	40
¿Por qué los ríos forman curvas?	42
¿Puede un bosque seguir absorbiendo carbono indefinidamente?	44
¿Por qué la pérdida de una especie puede cambiar un ecosistema?	46
¿Por qué puede apagarse una llama aunque quede combustible?	48
¿Por qué muchas hojas son verdes?	50
¿De dónde obtiene un árbol la mayor parte de su masa seca?	52
¿Cómo puede una semilla seguir viva sin crecer?	54
¿Por qué puede persistir la resistencia tras dejar de usar un antibiótico?	55
¿Por qué persiste la reproducción sexual?	57
¿Por qué son diferentes los hermanos?	58
¿Cómo pueden realizar distintas funciones células con el mismo ADN?	60
¿Cómo adquiere su forma un organismo en desarrollo?	62
¿Por qué los seres vivos envejecen a ritmos distintos?	63
¿Por qué necesitamos dormir?	65
¿Por qué no notamos el punto ciego de nuestra visión?	66
¿Pueden dos luces distintas parecer del mismo color?	68
¿Por qué un olor puede evocar un recuerdo?	70
¿Por qué una hora puede parecernos corta o larga?	71
¿Cómo aprenden los niños palabras que nadie les ha enseñado?	72
¿Cómo pueden orientarse las aves sobre un océano?	74
¿Cómo reconocemos la inteligencia de un animal muy diferente de nosotros?	75
¿Por qué puede un público empezar a aplaudir al mismo ritmo?	76
¿Cómo podemos entender el habla en una sala ruidosa?	78
¿Existe un número primo mayor que todos los demás?	80
¿Cómo podemos saber que un nudo no se puede deshacer?	82
¿Puede una figura tener área finita y perímetro infinito?	84
¿Por qué añadir una carretera puede empeorar el tráfico?	86
¿Cómo puede ser erróneo un resultado positivo?	89
¿Qué puede revelar el alivio del dolor sobre la experiencia de un pulpo?	92

¿Por qué el metal se siente más frío que la madera?

Un termómetro puede dar la misma lectura en una mesa de madera y una cuchara metálica y, aun así, la cuchara se siente más fría. Antes de culpar al instrumento o a la mano, considera qué ocurre al tocarlos. El termómetro estima una temperatura inicial. Tu mano crea una situación nueva: una piel más caliente entra en contacto con una superficie más fría y la energía empieza a pasar de una a otra.

Los materiales gestionan ese intercambio de manera diferente. La conductividad describe con qué facilidad viaja la energía por un material. La capacidad calorífica describe cuánta energía cambia su temperatura. Ambas importan porque la región que recibe calor se calienta mientras continúa el intercambio. Su efecto combinado se describe mediante la efusividad térmica. El aluminio corriente tiene una efusividad mucho mayor que la piel, mientras que los valores de la madera indicados en las notas son menores. Ese orden es el vínculo que faltaba entre la física y los objetos familiares: en estas condiciones, el metal aleja más la temperatura de contacto de la temperatura inicial de la piel. [2,3]

Esto no convierte el tacto en un termómetro preciso ni en un análisis químico. En dos experimentos, Ho y Jones encontraron que las personas podían distinguir materiales cuando las diferencias térmicas eran grandes, pero la localización de la estimulación térmica entre los dedos era limitada. Los cambios medidos de temperatura cutánea también fueron menores que las predicciones teóricas. El modelo recogía un mecanismo útil sin ofrecer una explicación completa de la respuesta medida. [1]

Una mano real es tejido vivo, con sangre que aporta calor. El contacto es imperfecto y los objetos tienen un grosor finito. Una lámina delgada no puede tratarse indefinidamente como un bloque enorme de la misma sustancia. Estos detalles ayudan a determinar hasta dónde se aplica la predicción sencilla. [2]

Por tanto, la expresión «más frío» requiere cuidado. Puede describir una temperatura medida menor o la sensación producida mientras cambia la temperatura de la piel. Esas afirmaciones no son intercambiables. Si el objeto empieza más caliente que la mano, se invierte la dirección de la transferencia de energía. El metal no lleva una reserva intrínseca de frío. La sensación surge de una interacción cuyas condiciones iniciales importan.

Notas técnicas (opcionales)

Transferir energía y cambiar la temperatura

La conductividad térmica relaciona el flujo de calor por conducción con un gradiente de temperatura. En una descripción unidimensional sencilla, la ley de Fourier es $q = -k \frac{dT}{dx}$. Aquí, q es el flujo de calor por unidad de superficie, k es la conductividad y el signo negativo indica una transferencia hacia temperaturas menores.

La ecuación no dice que el metal contenga una sustancia llamada frío ni que el frío entre en la mano. Tampoco dice que los cuerpos a la misma temperatura contengan la misma energía interna. La energía interna también depende de la cantidad de materia, la composición y el estado.

En el cambio de temperatura interviene una segunda propiedad: la capacidad calorífica. Cuando una región recibe energía, su aumento de temperatura depende de cuánta

energía se necesita para calentarla. En un sólido homogéneo, dentro de un intervalo en el que las propiedades puedan considerarse aproximadamente constantes, la capacidad calorífica por unidad de volumen es ρc , el producto de la densidad por la capacidad calorífica específica.

Por tanto, la conductividad y la capacidad calorífica responden a preguntas distintas. Una describe el transporte; la otra relaciona la energía recibida con el cambio de temperatura. Decir que el metal conduce bien el calor identifica una parte importante del mecanismo, pero deja fuera lo que sucede mientras se calienta la región que recibe la energía.

Un modelo que separa las variables

Consideremos una comparación idealizada. Dos cuerpos homogéneos tienen inicialmente temperaturas uniformes y se ponen en contacto perfecto a lo largo de una superficie plana. Durante un intervalo suficientemente breve, la perturbación térmica no alcanza sus caras opuestas. Tratarlos como semiinfinitos significa ignorar esos límites lejanos, no afirmar que los objetos reales se extiendan indefinidamente.

Una combinación útil en este modelo es la efusividad térmica, $e = \sqrt{k\rho c}$. Si T_s es la temperatura inicial de la piel y T_o la del objeto, la temperatura ideal de contacto es:

$$T_c = (e_s T_s + e_o T_o) / (e_s + e_o).$$

Es una media ponderada. Un objeto con efusividad alta respecto a la piel acerca la temperatura de contacto a su propia temperatura inicial. Una efusividad relativa baja la deja más cerca de la temperatura inicial de la piel. La revisión de Ho analiza esta formulación y sus límites para el contacto con la mano [2].

Los objetos de la pregunta difieren en su efusividad relativa. Los metales comunes, como el aluminio, tienen una efusividad mucho mayor que la piel, mientras que la madera suele tenerla menor [2,3]. Como comparación concreta, aplicar $e = \sqrt{k\rho c}$ a los valores de conductividad, densidad y calor específico tabulados por Rykaczewski [3, tabla 1] da aproximadamente 24 300 para el aluminio, 1180 para la piel y 700–920 para la madera, en $J/(m^2 K s^{1/2})$. Son efusividades calculadas a partir de parámetros publicados de los materiales, no mediciones de sensaciones. El valor del aluminio es unas 21 veces el de la piel; los de la madera son aproximadamente 0,59–0,78 veces ese valor. Estos parámetros concretos de la madera no definen todas las maderas ni todos los contactos. Establecen el orden pertinente: para objetos inicialmente más fríos que la mano, el modelo ideal sitúa la temperatura de contacto del aluminio mucho más cerca de la temperatura del objeto, mientras que la madera la deja más cerca de la de la piel. Así, el modelo conecta los materiales nombrados con sus distintos efectos de enfriamiento.

Un ejemplo deliberadamente hipotético hace visible la consecuencia sin presentar los cálculos como mediciones de materiales. Sean $T_s = 32\text{ °C}$ y $T_o = 22\text{ °C}$. Para $e_o/e_s = 1$, la expresión da 27 °C ; para una razón de 9, da 23 °C ; para $1/9$, da 31 °C . La temperatura inicial del objeto no ha cambiado. Lo que ha cambiado es el peso relativo de sus propiedades en el intercambio.

Estos números no son temperaturas medidas de la mano ni una tabla que describa metales y maderas concretos. Son resultados calculados bajo supuestos especificados. Su propósito es mostrar por qué una temperatura inicial igual no exige una respuesta igual durante el contacto.

Dónde termina la idealización

El contacto real implica resistencia térmica en la interfaz, una geometría finita y piel viva. La revisión de Ho analiza cómo estos factores y el aporte fisiológico de calor limitan los modelos sencillos [2]. Añadir decimales a una fórmula no compensa unos supuestos que no representan el contacto descrito.

La geometría proporciona una comprobación conceptual especialmente clara. Una lámina fina y una pieza gruesa del mismo material comparten propiedades intensivas, pero no la misma cantidad de materia disponible para intercambiar energía. Un modelo que ignora la superficie posterior puede funcionar durante un intervalo y fallar más tarde. No existe un tiempo de validez universal, independiente del material y del espesor.

También puede comprobarse el sentido del efecto sin introducir datos nuevos. Si el objeto empieza más caliente que la piel, la media ponderada queda por encima de la temperatura inicial de esta: el modelo predice calentamiento en vez de enfriamiento. Si ambas temperaturas iniciales son iguales, la diferencia de temperatura que impulsa la conducción desaparece en este modelo. Por tanto, «el metal siempre está frío» no es una explicación física.

Referencias

- [1] Ho, H.-N.; Jones, L. A. Contribution of thermal cues to material discrimination and localization. *Perception & Psychophysics* 68, 118–128 (2006). <https://doi.org/10.3758/BF03193662>
- [2] Ho, H.-N. Material recognition based on thermal cues: Mechanisms and applications. *Temperature* 5(1), 36–55 (2018; primera publicación electrónica en 2017). <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1372042>
- [3] Rykaczewski, K. Modeling thermal contact resistance at the finger-object interface. *Temperature* 6(1), 85–95 (2019; publicación electrónica en 2018). <https://doi.org/10.1080/23328940.2018.1551706>

¿Por qué flota el hielo?

Un cubito de hielo queda parcialmente por encima del agua, aunque esté hecho de la propia agua. La gravedad no ha dejado de actuar sobre él. Al hundirse en el líquido, el cubito desplaza agua y experimenta una fuerza de empuje hacia arriba. El hielo ordinario puede desplazar suficiente agua para equilibrar su peso antes de quedar completamente sumergido.

La razón es su menor densidad: una masa dada ocupa más espacio como hielo ordinario que como agua líquida cerca de la fusión. El valor de referencia del hielo hexagonal en su punto de fusión a presión normal es de unos 917 kilogramos por metro cúbico; el agua líquida cerca de la congelación está próxima a 1000. Estos valores redondeados describen condiciones concretas, no números permanentes para todos los estados del agua. [1, tabla 6] [2]

¿Por qué la congelación distribuye la misma sustancia en más espacio? Los enlaces de hidrógeno favorecen una disposición abierta en el hielo hexagonal ordinario. El líquido también tiene enlaces de hidrógeno, pero su organización cambiante permite un empaquetamiento medio más compacto. Un cristal puede estar más ordenado sin estar más densamente empaquetado. «Sólido» no significa que se haya eliminado todo hueco. [3]

La explicación molecular procede de evidencia interpretada mediante modelos estructurales. Los patrones de difracción restringen las disposiciones posibles, pero reconstruir posiciones precisas sigue implicando decisiones metodológicas. Chodkiewicz y sus colaboradores mostraron que tratar de manera diferente la dispersión múltiple afectaba a la exactitud de las distancias oxígeno-hidrógeno inferidas de la difracción de electrones. Esa incertidumbre se refiere a los detalles de la reconstrucción; no borra la diferencia de densidad bien establecida. [4]

La respuesta cotidiana tiene límites. Otras estructuras del hielo aparecen a otras presiones y temperaturas, y algunas son más densas que la forma ordinaria. La composición del líquido también afecta a la comparación. [3] Sin embargo, para un cubito de hielo ordinario en agua dulce cerca de la congelación, las explicaciones mecánica y molecular encajan: su disposición reduce su densidad y permite que el empuje lo sostenga mientras una parte permanece por encima de la superficie. Ni el frío ni la solidez por sí solos predicen si algo flota.

Notas técnicas (opcionales)

Por qué la densidad determina la flotación

Un líquido en reposo ejerce presión sobre la superficie de un objeto sumergido. La presión aumenta con la profundidad. Sumar las fuerzas sobre toda la superficie produce un empuje hacia arriba igual al peso del líquido desplazado. Esta es la forma hidrostática del principio de Arquímedes.

Si el volumen total del hielo es V y el volumen sumergido es V_s , su peso es $\rho_i V g$ y el empuje es $\rho_l V_s g$. Los subíndices i y l indican hielo y líquido; g es la aceleración de la gravedad. En equilibrio, despreciando el empuje del aire y las fuerzas capilares:

$$\rho_l V_s g = \rho_i V g; \text{ por tanto, } V_s/V = \rho_i/\rho_l.$$

Con los valores redondeados, $V_s/V = 917/1000 = 0,917$. Aproximadamente el 92 % del volumen queda sumergido y el 8 % sobresale. Esta afirmación se refiere al volumen, no a la altura. Una pieza irregular puede sobresalir una distancia considerable de la superficie mientras casi todo su volumen permanece bajo el agua.

Si empujamos ligeramente hacia abajo una pieza que flota libremente, desplaza más líquido mientras su peso apenas cambia. El empuje adicional favorece su retorno hacia arriba. Si la levantamos un poco, desplaza menos líquido y su peso favorece el descenso. Este argumento explica el equilibrio vertical; no determina por sí solo la orientación estable de una pieza irregular.

Una pieza completamente sumergida y más densa que el líquido no puede sostenerse únicamente mediante ese empuje. En cambio, una pieza menos densa puede equilibrar su peso antes de quedar completamente sumergida. Para cuerpos pequeños u objetos sometidos a otras fuerzas, es necesario ampliar el modelo. Un cubito de hielo libre es una buena aproximación, pero eso no convierte cualquier objeto que permanezca en la superficie en una prueba de menor densidad.

Qué podemos calcular y qué no

El equilibrio de flotación proporciona otra comprobación. Con los mismos valores redondeados, un kilogramo de agua líquida ocupa un litro, mientras que un kilogramo de hielo ocupa aproximadamente 1,09 litros. El aumento de volumen ronda el 9 %. Esa expansión y la fracción que sobresale, cercana al 8 %, no son el mismo porcentaje: sus denominadores difieren.

Para la expansión, comparamos el aumento con el volumen original del líquido: $1000/917 - 1 \approx 0,091$. Para la parte que sobresale, comparamos con el volumen total del hielo: $1 - 917/1000 = 0,083$. Confundir las preguntas puede producir números parecidos con explicaciones incorrectas.

También podemos predecir qué sucede en un recipiente ideal. El hielo puro que flota en agua pura ya desplaza una masa de agua igual a la suya. Tras fundirse, esa misma masa ocupa el volumen que antes desplazaba. Dentro de este modelo, el nivel no cambia, siempre que no haya pérdidas y que comparemos a la misma densidad final del líquido. El calentamiento del sistema, las sales o los materiales atrapados requieren correcciones. El argumento no se aplica sin cambios al hielo apoyado en tierra que después entra en el agua.

Referencias

- [1] IAPWS. Revised Release on the Equation of State 2006 for H₂O Ice Ih. R10-06(2009), septiembre de 2009. <https://iapws.org/technical-guidance/release/Ice-2009>
- [2] IAPWS. Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. R6-95(2018), septiembre de 2018. <https://iapws.org/documents/release/IAPWS-95.download>
- [3] Brini, E. et al. How Water's Properties Are Encoded in Its Molecular Structure and Energies. Chemical Reviews 117, 12385–12414 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00259>
- [4] Chodkiewicz, M. L. et al. Hirshfeld atom refinement and dynamical refinement of hexagonal ice structure from electron diffraction data. IUCrJ 11, 730–736 (2024). <https://doi.org/10.1107/S2052252524006808>

¿Por qué el cielo es azul de día?

La luz azul que llega de una zona despejada del cielo no ha viajado directamente del Sol a tus ojos. Las moléculas de la atmósfera han redirigido parte de la luz solar. No redirigen por igual todas las longitudes de onda visibles, de modo que la luz que llega desde esa dirección tiene una mezcla diferente de la del haz original.

Para partículas mucho menores que la longitud de onda, la explicación elemental de la dispersión favorece mucho las longitudes de onda más cortas. Es la dispersión de Rayleigh. Es una respuesta de la materia a la luz, no una reflexión en diminutas superficies azules. La conocida regla de longitud de onda es una aproximación; las propiedades y la respuesta direccional de las moléculas reales requieren correcciones. [1]

La explicación puede ponerse a prueba sin tratar el color del cielo como su propia demostración. Jordan y sus colaboradores midieron la extinción de la luz a través de gases, incluidos nitrógeno, oxígeno y aire, mediante una cavidad óptica. Sus mediciones de dispersión coincidieron con valores anteriores dentro de la incertidumbre de medición. Ese resultado de laboratorio pone a prueba la interacción implicada, en vez de reproducir todos los rasgos de un cielo exterior. [1]

Otra pista es la polarización, la organización de las direcciones del campo eléctrico de la luz. Su patrón varía por el cielo respecto al Sol. Un modelo sencillo de dispersión única predice un marcado patrón direccional, mientras las atmósferas reales lo modifican mediante dispersión adicional y otros componentes. [2] La evidencia es más rica que una sola descripción de color.

Pero si las longitudes de onda más cortas se dispersan más, ¿por qué no llamar violeta al cielo? También importan la luz disponible del Sol y la respuesta de nuestro sistema visual. La explicación de la NASA incluye explícitamente la diferencia de sensibilidad visual al azul y al violeta. [3] La atmósfera determina qué luz nos llega; la visión determina cómo contribuye esa luz a la experiencia de color.

Las nubes, el polvo y la bruma pueden cambiar el balance, por lo que esta explicación se refiere al cielo diurno despejado habitual. La conclusión importante no es que el aire contenga pigmento azul. Es que una interacción física dependiente de la longitud de onda y un observador también dependiente de ella explican conjuntamente la apariencia.

Notas técnicas (opcionales)

Qué predice la dependencia con la longitud de onda

En el régimen de Rayleigh, las estructuras dispersoras son mucho menores que la longitud de onda. El campo eléctrico induce una respuesta en la materia, y esa respuesta radia en otras direcciones. En una comparación simplificada, lejos de las resonancias de absorción y con una respuesta del material que varía lentamente, la sección eficaz de dispersión es aproximadamente proporcional a $1/\lambda^4$. La sección eficaz mide la eficacia con la que una molécula dispersa la luz incidente; no es la sombra geométrica de la molécula [1].

Tomemos 450 y 650 nanómetros como dos longitudes de onda visibles ilustrativas. Mantener fijos los demás factores da una razón entre secciones eficaces de $(650/450)^4$,

aproximadamente 4,35. En este modelo, la longitud de onda más corta se dispersa con una intensidad varias veces mayor. Es una razón calculada, no una medición de cuántas veces más brillante parece una zona concreta del cielo azul que otra zona de cielo rojo.

La distinción es esencial. Calcular el brillo del cielo también requiere el espectro incidente, la abundancia molecular, el ángulo de dispersión, la atenuación antes y después del suceso de dispersión y cualquier dispersión adicional. La relación de cuarta potencia aporta un factor a ese cálculo. No es un espectro completo ni una teoría completa de la percepción del color.

Tampoco es una ley de potencias exacta para todos los gases en todas las longitudes de onda. El índice de refracción del gas varía con la longitud de onda, y la anisotropía molecular introduce correcciones. Jordan y sus colaboradores incluyen explícitamente factores de índice de refracción y despolarización en su tratamiento de la dispersión [1]. La ley elemental recoge la tendencia dominante sin sustituir esos refinamientos.

Pruebas más allá de una explicación plausible

El mecanismo puede ponerse a prueba sin tomar el azul del cielo como demostración de sí mismo. Jordan y sus colaboradores utilizaron una cavidad óptica de banda ancha para medir espectros de extinción de gases, entre ellos nitrógeno, oxígeno y aire. Las mediciones de dispersión que obtuvieron concordaban con los valores de la bibliografía dentro de la incertidumbre de medida [1]. Son mediciones de laboratorio, no una fotografía reconstruida de un cielo exterior.

Una cavidad óptica hace que la luz recorra una trayectoria efectiva mucho más larga que el propio aparato. Eso amplifica las pérdidas pequeñas lo suficiente para medirlas. Pero las pérdidas siguen necesitando interpretación: el estudio distingue las contribuciones de dispersión y absorción. Que un instrumento detecte menos luz transmitida no identifica, por ese solo hecho, el proceso responsable de cada fotón ausente.

La polarización aporta otra restricción. La luz del cielo puede estar parcialmente polarizada, con un patrón que depende de la dirección de observación respecto al Sol [2]. En una descripción ideal de dispersión única, para iluminación no polarizada y un dispersor isótropo, el grado de polarización lineal es $\sin^2\theta/(1 + \cos^2\theta)$, donde θ es el ángulo de dispersión. Alcanza su máximo ideal a 90°. Los cielos reales no tienen por qué alcanzar ese máximo: la anisotropía molecular, los aerosoles y la dispersión múltiple modifican el resultado.

La cuestión no es que una medición de polarización identifique de forma única toda la atmósfera. Es que la intensidad, la dependencia espectral y la polarización deben ser compatibles entre sí. Un mecanismo que solo produjera la palabra «azul», pero predijera un comportamiento angular incorrecto, sería incompleto.

Referencias

- [1] Jordan, N. et al. A broadband cavity-enhanced spectrometer for atmospheric trace gas measurements and Rayleigh scattering cross sections in the cyan region (470–540 nm). *Atmospheric Measurement Techniques* 12, 1277–1293 (2019). <https://doi.org/10.5194/amt-12-1277-2019>
- [2] NASA Goddard. Rayleigh Scattering. Notas docentes de ciencias atmosféricas, sección «Rayleigh Scattering and Polarization». https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/anonftp/acd/daac_ozone/Lecture4/Text/Lecture_4/rayleigh.html
- [3] NASA Science. Wave Behaviors. https://science.nasa.gov/ems/03_behaviors/

¿Pueden dos personas ver el mismo arcoíris?

Dos personas pueden decir razonablemente que ven el mismo arcoíris. Comparten un chubasco, la luz solar y un arco reconocible. Sin embargo, los rayos que entran en sus ojos son diferentes. Un arcoíris es un patrón de direcciones de visión, no un aro pintado que ocupa un lugar fijo entre las gotas.

En el arcoíris primario, la luz entra en una gota, cambia de dirección, se refleja internamente y vuelve a cambiar de dirección al salir. Las distintas longitudes de onda siguen trayectorias ligeramente diferentes. La geometría combinada concentra los rayos emergentes alrededor de direcciones características y produce el arco de colores que ve un observador. Mover al observador cambia qué gotas envían luz en esas direcciones. [1]

Esa dependencia del punto de vista no hace imaginario al arcoíris. La relación entre luz solar, gotas y observador es física y predecible. Tampoco significa que el observador pueda elegir cualquier posición para el arco. Las tres partes de la disposición restringen lo que aparece.

El arco familiar puede formar parte de un círculo completo. Normalmente, el suelo o la lluvia disponible ocultan una parte; una vista adecuada desde un avión puede revelar la forma circular. Una dirección de visión posible no basta por sí sola. También debe haber gotas iluminadas donde puedan aportar luz. [1]

La imagen sencilla de rayos explica la geometría general, mientras las preguntas más finas requieren óptica ondulatoria e información sobre el tamaño de las gotas. La comparación de arcos de nubes y niebla realizada por Lee encontró que incluir distribuciones realistas de tamaños reducía la mayoría de las diferencias perceptibles de color y luminancia entre dos tratamientos teóricos. Coincidir en apariencia no equivale a afirmar que los tratamientos predicen números idénticos en todas partes. [2]

Así, «el mismo arcoíris» puede nombrar un acontecimiento compartido sin afirmar que la luz sea idéntica en dos lugares. El patrón es lo bastante común para identificarlo juntos, pero cada vista se produce por su propia geometría. La explicación del arco general es sólida; predecir su apariencia fina requiere la iluminación y la distribución reales de las gotas.

Notas técnicas (opcionales)

Cómo selecciona direcciones una gota

Para el arcoíris primario, la construcción elemental con rayos incluye refracción al entrar en una gota, una reflexión interna y refracción al salir. La refracción cambia la dirección en la frontera porque el índice de refracción difiere entre el agua y el aire. Su dependencia con la longitud de onda separa las distribuciones angulares de los colores [1].

No todos los rayos salen con el ángulo del arcoíris. Un haz de rayos incidentes paralelos alcanza una gota esférica a distintas distancias de su centro. Las direcciones de salida varían con ese parámetro de impacto. Cerca de una dirección concreta, la desviación cambia especialmente despacio. Muchos rayos incidentes próximos contribuyen entonces a una región angular de salida relativamente estrecha. Esa concentración explica el arco primario brillante en la óptica geométrica.

Podemos hacer explícita la construcción sin tratar 42° como una constante universal. Sean i el ángulo de incidencia y r el de refracción, ambos medidos desde la normal local a la superficie. Para aire aproximado por un índice de refracción de 1 y una gota esférica homogénea con índice relativo n , la ley de Snell es $\sin i = n \sin r$. Con una reflexión interna, la desviación es $D = \pi + 2i - 4r$. El radio angular del arco alrededor de la dirección antisolar es $\alpha = \pi - D$.

En la desviación estacionaria, la derivación da $2 \cos i = n \cos r$ y, por tanto, $\cos^2 i = (n^2 - 1)/3$. Elegir el índice ilustrativo $n = 4/3$ da $i \approx 59,4^\circ$, $r \approx 40,2^\circ$ y $\alpha \approx 42,0^\circ$. Es un cálculo ideal para un índice especificado, no un ángulo universal medido ni una afirmación de que el agua tenga exactamente ese índice en todas las longitudes de onda.

Referencias

[1] NOAA NESDIS. What Causes a Rainbow?

<https://www.nesdis.noaa.gov/about/k-12-education/optical-phenomena/what-causes-rainbow>

[2] Lee, R. L. Mie theory, Airy theory, and the natural rainbow. *Applied Optics* 37, 1506-1519 (1998).

<https://doi.org/10.1364/AO.37.001506>

¿Por qué el rozamiento puede frenarnos y ayudarnos a caminar?

El rozamiento parece desempeñar papeles opuestos. Frena una caja que desliza por el suelo y, sin embargo, ayuda a avanzar a quien camina. La aparente contradicción desaparece cuando examinamos el contacto en vez de asignar al rozamiento una dirección a partir del movimiento del cuerpo entero.

Un zapato apoyado puede permanecer momentáneamente en reposo respecto al suelo mientras el cuerpo avanza. Su contacto resiste la tendencia a resbalar hacia atrás. Por tanto, el rozamiento puede actuar hacia delante sobre quien camina. La caja deslizante presenta un contacto diferente: sus superficies ya se mueven una respecto a otra.

El rozamiento estático es la fuerza asociada a un contacto que no desliza. Se ajusta a las exigencias de la situación, hasta un límite. Un empujón suave sobre una caja inmóvil no genera automáticamente la mayor fuerza que podría sostener el contacto. Confundir la fuerza real con su máximo produce respuestas erróneas incluso en un modelo elemental. [1]

La imagen microscópica también se resiste a un lema sencillo. Dos superficies aparentemente planas se tocan mediante una población de contactos menores. La adhesión, la deformación y las películas superficiales pueden importar junto con la rugosidad. Un coeficiente de rozamiento resume el comportamiento bajo condiciones especificadas; no tiene por qué ser una propiedad intemporal de un par de nombres de materiales. [1]

Dieterich y Kilgore observaron directamente contactos de rozamiento en laboratorio y relacionaron cambios de resistencia con cambios de los contactos y de su edad. Sus experimentos no explican todos los zapatos ni todas las fallas geológicas, pero muestran por qué puede importar la historia del contacto. [2]

Por tanto, el rozamiento no es universalmente útil ni universalmente obstructivo. Ayuda a mantener el agarre al caminar y convierte el movimiento organizado en otras formas durante el deslizamiento. Su dirección y sus consecuencias se siguen del movimiento relativo, o del intento de movimiento, en el contacto. Preguntar solo en qué dirección viaja el objeto entero deja fuera la parte del sistema que determina la fuerza.

Notas técnicas (opcionales)

Por qué el suelo puede impulsar hacia delante a quien camina

Durante una parte propulsora del paso, la acción muscular tiende a llevar el pie apoyado hacia atrás respecto al suelo. Si el contacto se mantiene sin deslizar, el suelo ejerce sobre el pie una fuerza tangencial hacia delante. Esa fuerza contribuye a acelerar hacia delante el centro de masas de la persona. La Tierra recibe el cambio opuesto de cantidad de movimiento, aunque su enorme masa hace despreciable, para este propósito, el cambio resultante de su velocidad.

Un ciclo completo de marcha es más complejo que esa fase aislada. La colocación del pie puede producir una fase de frenado, además de una fase propulsora. Con rapidez media constante sobre suelo horizontal, las ganancias y pérdidas de cantidad de movimiento horizontal se equilibran a lo largo de un ciclo. Por tanto, también sería un error decir

que el rozamiento debe apuntar hacia delante durante todo el paso. Su dirección depende de la mecánica instantánea del contacto.

Una ilustración numérica sencilla muestra la diferencia entre un requisito y un límite. Supongamos que un contacto soporta $N = 600 \text{ N}$ y que su coeficiente estático es provisionalmente $\mu_s = 0,5$. El modelo permite una fuerza tangencial de hasta 300 N . Si el movimiento requiere solo 100 N en ese instante, la fuerza de rozamiento es 100 N , no 300 N . Son datos hipotéticos, no valores medidos de un zapato o una persona concretos.

Si no hay deslizamiento, ¿de dónde viene la energía?

En un contacto ideal fijo respecto a un suelo rígido e inmóvil, el punto donde actúa la fuerza del suelo tiene velocidad cero. Por tanto, la potencia mecánica instantánea transmitida por ese contacto inmóvil es cero. Aun así, la fuerza del suelo puede cambiar la cantidad de movimiento de la persona. La fuerza y la transferencia de energía responden a preguntas diferentes: una fuerza no tiene que aportar potencia en cada instante en que aporta impulso.

La energía química interna de la persona permite el trabajo muscular y la reorganización de los segmentos del cuerpo. Un cálculo con la fuerza multiplicada por el desplazamiento del centro de masas describe una relación de energía cinética del centro de masas; no es automáticamente el trabajo transferido en el contacto real del pie. Confundir esos dos desplazamientos hace que el suelo parezca una fuente de energía inexplicada.

La marcha real añade deformación de la suela y del suelo, movimiento de las zonas de contacto, impactos y disipación interna. La afirmación ideal de potencia cero no debe extenderse a todas las partes de una interacción real entre zapato y suelo. Identifica un caso límite controlado que explica cómo el agarre puede facilitar el movimiento sin que el suelo suministre la energía metabólica.

Por qué el deslizamiento suele disipar energía mecánica

Para dos superficies que deslizan una respecto a la otra bajo una fuerza de rozamiento de magnitud f , el ritmo al que se disipa su energía mecánica macroscópica conjunta es, en el modelo sencillo, f multiplicada por su rapidez relativa de deslizamiento. Parte de la energía aparece como energía interna; también pueden importar la deformación, la vibración y el desgaste. La energía no se destruye cuando disminuye el movimiento visible.

Utilizar los valores ilustrativos $f = 20 \text{ N}$ y una distancia relativa de deslizamiento de 3 m da 60 J transferidos fuera del movimiento mecánico macroscópico considerado. Ese número no determina por sí solo el aumento de temperatura de ninguno de los cuerpos. También harían falta sus capacidades caloríficas, el reparto de la energía depositada y el transporte posterior de calor. Es la misma distinción que impide reducir el rozamiento a una fórmula universal del ritmo de calentamiento.

Tampoco una rapidez de deslizamiento nula implica que un contacto real carezca de pérdidas internas. Los materiales pueden deformarse y relajarse, pueden formarse y desaparecer zonas de contacto, y una región nominalmente inmóvil puede contener pequeños movimientos locales. La división macroscópica entre estático y cinético es útil sin agotar la descripción microscópica.

Referencias

- [1] OpenStax. University Physics Volume 1, §6.2, Friction.
<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-2-friction>
- [2] Dieterich, J. H.; Kilgore, B. D. Direct observation of frictional contacts: New insights for state-dependent properties. *Pure and Applied Geophysics* 143, 283–302 (1994).
<https://doi.org/10.1007/BF00874332>

¿Por qué el jabón ayuda a eliminar la grasa?

Limpiar grasa es un problema de trasladar material, no de hacerlo desaparecer. El agua puede fluir sobre una superficie grasa y dejar atrás gran parte del depósito. El jabón cambia las relaciones entre el agua, el aceite y la superficie, permitiendo que el material se desprenda, se disperse y salga con el líquido.

Un ion de jabón tiene partes que interactúan de forma diferente con el agua: una cabeza iónica y una región hidrocarbonada. La cabeza puede hidratarse, mientras que exponer la parte hidrocarbonada tiene un coste energético distinto. Este contraste ayuda a explicar por qué el jabón se acumula en las interfaces y forma agregados. [1]

Esa imagen molecular es solo el comienzo. Retirar una mancha grasa cambia las áreas donde se encuentran aceite, agua y sólido. El tensioactivo adsorbido cambia esas fronteras, y el movimiento mecánico puede ayudar a desprender o fragmentar el depósito. Qué proceso domina depende de la grasa y de la superficie concretas. La explicación de Gómez Herrera distingue varios mecanismos de eliminación y prevención de la redeposición. [3]

Las micelas son agregados que resguardan regiones hidrocarbonadas mientras presentan grupos hidratados al agua. Pueden alojar parte del material oleoso. Las gotas de aceite dispersas de mayor tamaño son otra posibilidad. Emulsión y micela no son nombres intercambiables de una estructura universal de limpieza. La mezcla crea gotas nuevas y área interfacial; estabilizar esas gotas para que no se fusionen es otra parte del proceso. [1,2]

La química del agua también cambia el resultado. El calcio y el magnesio pueden formar sales poco solubles con el jabón ordinario, reduciendo el jabón disponible en solución y produciendo depósitos. Los detergentes sintéticos no comparten todos exactamente la misma química ni la misma respuesta. [1,2]

Por tanto, la espuma es un atajo poco fiable para juzgar la eliminación. La evidencia pertinente se refiere a lo que salió de la superficie y a lo que permaneció, no a lo llamativas que fueran las burbujas. Una explicación completa sigue el desprendimiento, la dispersión, el transporte y el posible retorno a la superficie. El jabón ayuda a esa secuencia mediante la fisicoquímica; un dibujo ordenado de un agregado no puede representar todo el lavado.

Notas técnicas (opcionales)

Desprender no es lo mismo que disolver

La grasa sobre un sólido crea varias interfaces pertinentes: sólido-agua, sólido-aceite y aceite-agua. Desprender un depósito intercambia áreas de esas interfaces. La adsorción del tensioactivo puede cambiar sus energías libres y la manera en que el agua moja el sólido. El movimiento mecánico puede entonces ayudar a desplazar y fragmentar el depósito. Qué vía predomina depende del sustrato y de la grasa, no solo de que aparezca la palabra jabón en un envase. Gómez Herrera distingue varios mecanismos de eliminación y de prevención de la redeposición en su revisión de la detergencia [3].

Una expresión simplificada útil es una contribución interfacial $\Delta G = \gamma \Delta A$, manteniendo fija la tensión interfacial γ . Crear más área de interfaz aceite-agua cuesta energía libre en esta descripción. Reducir y disminuye ese coste. Eso no establece que toda mancha

aceitosa vaya a desprenderse espontáneamente: un balance completo debe incluir también los cambios en las interfaces del sólido, la adsorción y otras contribuciones.

Consideremos una ilustración puramente geométrica. Si dividimos un volumen fijo de aceite en gotas esféricas idénticas de radio r , su área total es $A = 3V/r$. Reducir r por un factor de diez aumenta el área por un factor de diez. Por eso, dividir el aceite en gotas más pequeñas modifica tanto el problema interfacial. La ecuación es un cálculo de un modelo, no una afirmación de que un lavado real contenga esferas idénticas.

Referencias

[1] OpenStax. Organic Chemistry, §27.2, Soap.

<https://openstax.org/books/organic-chemistry/pages/27-2-soap>

[2] OpenStax. Chemistry: Atoms First 2e, §11.5, Colloids, especialmente emulsiones y jabones.

<https://openstax.org/books/chemistry-atoms-first-2e/pages/11-5-colloids>

[3] Gómez Herrera, C. Detergency. Its main mechanisms. Grasas y Aceites 47(6), 419-435 (1996).

<https://doi.org/10.3989/gya.1996.v47.i6.890> (resumen de la editorial consultado).

¿Por qué podemos ver a través del vidrio, pero no del metal?

El vidrio y el metal resisten una mano, pero una ventana nos permite ver a través de ella mientras una chapa metálica gruesa normalmente no. El contraste no es una diferencia entre materia y espacio vacío. Se refiere a cómo responden los materiales a la luz visible.

La luz que encuentra una muestra puede reflejarse, transmitirse o absorberse. La reflexión envía energía hacia fuera; la absorción la transfiere al material. Ambas pueden reducir lo que emerge por el otro lado, pero son resultados diferentes. Toda explicación de la transparencia debe seguir esas alternativas. [3]

En un intervalo transparente de un dieléctrico corriente, las cargas del material responden a la luz sin disipar mucha de su energía a lo largo del espesor implicado. Por tanto, la luz interactúa con el vidrio incluso cuando lo atraviesa. La refracción, el cambio de dirección en una frontera, constituye evidencia de esa interacción. [1]

Los portadores móviles de carga dan a los metales una respuesta diferente. En intervalos de frecuencia adecuados, su movimiento colectivo produce reflexión intensa y campos que disminuyen rápidamente dentro del material. Un modelo sencillo de portadores explica una parte importante de este comportamiento, aunque los metales reales tienen procesos electrónicos adicionales. [2]

La precisión «visible» importa. Un vidrio puede transmitir un intervalo de longitudes de onda y absorber otro. También importan el espesor y la estructura, y una capa metálica suficientemente delgada puede transmitir algo de luz. Ni «vidrio» ni «metal» es un veredicto óptico incondicional.

Por último, ver a través de una ventana requiere algo más que recibir luz. Debe sobrevivir suficiente información sobre la dirección para formar una imagen reconocible. Una superficie esmerilada ilustra por qué la transmisión y una vista clara son logros diferentes. Un vidrio adecuado proporciona ambas en condiciones familiares; los metales gruesos corrientes no. Por qué cualquiera de los dos materiales resiste la penetración de otro sólido sigue siendo una pregunta separada, aunque ambas explicaciones se refieran al comportamiento de la materia.

Notas técnicas (opcionales)

Seguir la energía incidente

Cuando la luz llega a una muestra, parte de su energía puede reflejarse, parte transmitirse y parte absorberse [3]. Para una muestra pasiva en una medición óptica estacionaria, sin conversión significativa de longitudes de onda y contando todas las direcciones de salida, las fracciones satisfacen $R + T + A = 1$. Tanto la reflexión como la absorción pueden reducir la transmisión, pero dejan la energía en lugares diferentes.

Por tanto, un espejo opaco y una superficie negra opaca no tienen por qué comportarse de manera parecida. El primero devuelve gran parte de la luz incidente; la segunda absorbe gran parte de ella. Una medición que solo recoge el haz transmitido directo también puede confundir la dispersión fuera de ese haz con la absorción. Para separar

los mecanismos, también deben considerarse la luz reflejada y la dispersada de forma difusa.

Estas distinciones convierten el título en una pregunta experimental. Especifica la longitud de onda y el espesor, y después pregunta qué vías retiran luz del haz que avanza. «No puede atravesarlo» describe el resultado, pero todavía no es su explicación física.

La materia transparente también responde

En una región transparente de un dieléctrico corriente, las cargas del material responden al campo luminoso sin disipar una fracción grande de su energía a lo largo del espesor de la muestra. Su respuesta electromagnética colectiva modifica la propagación. La refracción es prueba de interacción, no de que la luz haya evitado por completo el material. El tratamiento clásico de la respuesta conecta ese cambio con el movimiento de las cargas dependiente de la frecuencia [1].

Es engañoso imaginar la propagación por una ventana como una secuencia de absorciones corrientes seguidas de reemisiones espontáneas aleatorias. Esa imagen perdería las relaciones de fase y dirección responsables de la transmisión coherente y de la refracción. El campo óptico macroscópico incluye el campo incidente y la respuesta organizada del material.

En una descripción cuántica, la estructura electrónica restringe los procesos de absorción disponibles. Los vidrios transparentes comunes tienen una ventana de transmisión visible porque la absorción electrónica intensa no se distribuye uniformemente por ese intervalo. Otros procesos de absorción adquieren importancia en otras regiones del espectro. La expresión «ventana de transmisión» es más exacta que «el vidrio no absorbe luz».

Por qué responde de otro modo un metal

Los metales tienen portadores de carga móviles que pueden responder intensamente a un campo óptico aplicado [2]. En una descripción sencilla de portadores libres, la respuesta dieléctrica depende de la frecuencia, la densidad de portadores y el amortiguamiento. En intervalos de frecuencia adecuados, la respuesta produce una reflexión intensa y campos que disminuyen rápidamente hacia el interior del material. Los metales reales también tienen transiciones electrónicas que van más allá de este modelo elemental de portadores.

Una expresión idealizada, omitiendo el amortiguamiento, es $\epsilon_r(\omega) = 1 - \omega_p^2/\omega^2$. Aquí, ϵ_r es la permitividad relativa y ω_p es la frecuencia de plasma del modelo. Por debajo de ω_p , la expresión es negativa. En ese límite sin pérdidas, el campo dentro de un material semiinfinito puede ser evanescente aunque la absorción sea cero. Por tanto, bloquear la transmisión no demuestra por sí solo que se absorba toda la energía incidente.

Añadir amortiguamiento permite la disipación. Incluir la respuesta de los electrones ligados y las transiciones entre bandas electrónicas es necesario para obtener un espectro óptico realista. La expresión sencilla identifica por qué importa la respuesta eléctrica; no debe utilizarse como un espectro numérico universal para todos los metales ni como explicación de todos los colores metálicos.

El espesor introduce una diferencia esencial

Si la amplitud del campo en un medio homogéneo absorbente disminuye como $\exp(-z/\delta)$, la intensidad disminuye como $\exp(-2z/\delta)$. Por tanto, la longitud de decaimiento de la amplitud δ es el doble de la correspondiente longitud de decaimiento de la intensidad. Citar una profundidad de penetración sin definir si describe el campo o la intensidad introduce una ambigüedad de un factor de dos.

Una expresión práctica para la intensidad es $I(z) = I(0) \exp(-\alpha z)$, donde α es un coeficiente de atenuación para el proceso y la longitud de onda especificados. Supongamos, solo como ilustración, que $\alpha = 10 \text{ m}^{-1}$ y el recorrido es 0,01 m. El factor de intensidad interna es $\exp(-0,1)$, aproximadamente 0,905. A 0,1 m es $\exp(-1)$, aproximadamente 0,368. Son datos hipotéticos, no valores medidos de un vidrio identificado.

Incluso ese cálculo omite las reflexiones en las interfaces y las posibles interferencias entre las superficies anterior y posterior. Los recubrimientos metálicos finos pueden transmitir parcialmente, y las multicapas ópticas aprovechan deliberadamente los efectos de las interfaces. La distinción familiar entre una ventana y una lámina metálica describe muestras macroscópicas comunes, no un teorema según el cual una categoría siempre transmite y la otra nunca lo hace.

Referencias

- [1] Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. The Feynman Lectures on Physics, vol. I, capítulo 31, The Origin of the Refractive Index. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_31.html
- [2] Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. The Feynman Lectures on Physics, vol. II, capítulo 32, Refractive Index of Dense Materials. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_32.html
- [3] Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. The Feynman Lectures on Physics, vol. II, capítulo 33, Reflection from Surfaces. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_33.html

¿Por qué se agota una batería?

Cuando se detiene un aparato alimentado por batería, esta no ha agotado necesariamente una reserva de electrones. «Vacía» describe la incapacidad de proporcionar la salida que exige el aparato. La descarga ordinaria, la pérdida temporal de voltaje bajo carga y el envejecimiento permanente pueden contribuir, pero no son el mismo estado físico.

Una celda organiza reacciones químicas de modo que los electrones puedan viajar por un circuito externo mientras los iones se mueven internamente para mantener el balance de carga. En una celda de ion-litio, los iones de litio se desplazan entre los materiales de los electrodos durante la carga y la descarga. Las vías electrónicas e iónicas trabajan juntas; ninguna es una reserva de partículas desechables que simplemente desaparece. [1]

La posibilidad de impulsar el proceso procede de una diferencia de energía libre química. A medida que cambia el estado de la celda, cambia la salida eléctrica que puede sostener. El voltaje medido cuando circula poca corriente no garantiza el voltaje disponible mientras un aparato consume potencia. Por tanto, las pérdidas internas y las exigencias del aparato pertenecen a la explicación.

Recargar una celda recargable requiere una entrada de energía que revierte gran parte del cambio electroquímico útil. No es reponer electrones consumidos, y no todas las celdas están diseñadas para invertir repetidamente el proceso. El reposo también puede cambiar un voltaje medido sin restaurar el estado químico original. [1]

El envejecimiento añade otra capa. Edge y sus colaboradores distinguen los mecanismos de degradación de sus efectos sobre la capacidad y la potencia, y destacan las interacciones entre mecanismos. Las causas dominantes dependen de la química, la construcción y la historia. Una pérdida de rendimiento no identifica un fallo universal dentro de todas las baterías. [3]

Por tanto, la palabra práctica «vacía» oculta varias preguntas científicas. ¿Cuánta carga sigue pudiendo suministrarse? ¿A qué voltaje y ritmo? ¿Qué puede recuperarse y qué ha cambiado permanentemente? La explicación química y eléctrica conecta estas preguntas sin convertir la batería en un tarro de bolitas de energía. La nota técnica da la relación entre la energía libre de reacción y el voltaje de equilibrio. [2]

Notas técnicas (opcionales)

El voltaje está conectado con el cambio de energía libre

Para una reacción electroquímica reversible que transfiere n moles de electrones por mol de reacción, la relación $\Delta G = -nFE$ conecta el cambio molar de energía libre de Gibbs de la reacción declarada con el potencial de equilibrio de la celda E . F es la constante de Faraday. Los signos se refieren a un sentido especificado de la reacción. Un voltaje de equilibrio positivo para la descarga corresponde a un cambio negativo de energía libre en ese sentido [2].

Los potenciales químicos que intervienen en ΔG dependen de la composición y de las condiciones. A medida que la descarga modifica la celda, puede cambiar el voltaje de equilibrio. La curva exacta depende de la química: el comportamiento de las fases puede producir regiones relativamente planas, y el voltaje no tiene por qué disminuir de forma

suave y proporcional a la carga restante. Por tanto, una lectura de voltaje no puede servir universalmente como indicador lineal de carga.

El voltaje de equilibrio tampoco es idéntico al voltaje en los terminales mientras el aparato consume corriente. La cinética de los electrodos, las limitaciones del transporte y la resistencia eléctrica introducen diferencias. Un circuito práctico puede dejar de funcionar porque el voltaje en los terminales cae por debajo del umbral que necesita, aunque con otra carga externa todavía pudiera continuar la reacción.

La capacidad de carga y la energía no son el mismo número

La carga entregada durante la descarga es $q = \int I \, dt$. El amperio-hora es una unidad de carga: $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$. La energía eléctrica entregada es $W = \int VI \, dt$, que depende del voltaje variable en los terminales además de la corriente. Por tanto, dos celdas con la misma capacidad de carga pueden entregar cantidades de energía distintas.

En un ejemplo deliberadamente simplificado, supongamos que una celda hipotética entrega 2 Ah a un voltaje constante de 3 V . Su carga entregada es 7200 C y su energía eléctrica entregada es 6 Wh , o $21,6 \text{ kJ}$. Este cálculo supone voltaje constante y no describe una curva de descarga medida. Si el voltaje cambia durante la descarga, la integral debe sustituir a esa multiplicación.

El ejemplo también muestra por qué una capacidad nominal necesita condiciones de ensayo. La corriente, la temperatura, el punto final de descarga y la historia previa influyen en el resultado utilizable. Una etiqueta no establece por sí sola la energía disponible para cualquier aparato imaginable, y un cálculo de energía no puede predecir la temperatura interna sin una descripción térmica aparte.

Por qué una carga externa puede hacer que la batería parezca agotada antes

Una aproximación sencilla de circuito escribe $V_{\text{terminal}} = E - IR$, donde R representa una resistencia interna efectiva. Para los valores ilustrativos $E = 3 \text{ V}$ y $R = 0,2 \, \Omega$, una carga que exige 1 A da $2,8 \text{ V}$, mientras que una de 3 A da $2,4 \text{ V}$. Son valores elegidos para aislar un efecto, no especificaciones de una batería comercial.

Las celdas reales también pueden desarrollar gradientes de concentración y sobrepotenciales cinéticos. Retirar la carga externa permite que se relajen algunos gradientes fuera del equilibrio, por lo que puede recuperarse el voltaje en los terminales. Esa recuperación no significa que la reacción de descarga se haya invertido espontáneamente por completo. Una variable de estado medida después de la relajación y un voltaje de funcionamiento bajo carga son observaciones distintas.

Por eso, identificar la causa de una desconexión requiere más que notar que la pantalla se apagó. Una celda puede alcanzar un límite de funcionamiento permitido, una limitación de reacción o transporte, o un umbral de voltaje fijado por el aparato. La pregunta pertinente es qué suministro sigue disponible en condiciones especificadas, no si ha desaparecido literalmente toda especie reactiva.

Referencias

- [1] OpenStax. Chemistry 2e, §17.5, Batteries and Fuel Cells. <https://openstax.org/books/chemistry-2e/pages/17-5-batteries-and-fuel-cells>
- [2] OpenStax. Chemistry 2e, §17.4, Potential, Free Energy, and Equilibrium. <https://openstax.org/books/chemistry-2e/pages/17-4-potential-free-energy-and-equilibrium>
- [3] Edge, J. S. et al. Lithium ion battery degradation: what you need to know. Physical Chemistry Chemical Physics 23, 8200–8221 (2021). <https://doi.org/10.1039/D1CP00359C> (resumen y registro bibliográfico consultados a través del repositorio de la Universidad de Bristol).

¿Por qué un imán atrae algunos metales y otros no?

Un imán puede levantar hierro sin producir un movimiento evidente en un objeto de cobre de aspecto parecido. Ambos conducen electricidad, de modo que la conductividad no puede explicar por sí sola el contraste. Debemos preguntar cómo responde magnéticamente el material y cómo interactúa esa respuesta con el campo alrededor del imán.

Los electrones aportan momentos magnéticos, pero esas contribuciones no se combinan del mismo modo en todos los materiales. Pueden cancelarse en gran medida, responder débilmente a un campo o desarrollar orden colectivo. Las distinciones llamadas diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo describen tipos diferentes de comportamiento, no una división entre objetos con magnetismo y objetos completamente ajenos a él. [1]

Una muestra ferromagnética puede contener dominios cuya magnetización apunta en direcciones diferentes. Una magnetización considerable dentro de cada dominio puede coexistir con un efecto global mucho menor. Un campo aplicado puede cambiar su organización. Poseer esa estructura es diferente de ser ya un imán permanente fuerte. [1,2]

El movimiento añade otro requisito. Una respuesta magnética y una fuerza que atrae una muestra hacia un lugar concreto no son preguntas idénticas. La variación espacial del campo ayuda a determinar la fuerza. Describir solo el material deja fuera la disposición en la que se ensaya.

Una demostración manual también tiene un límite de detección. Si un objeto no se mueve visiblemente, el resultado no establece una respuesta exactamente nula. Un efecto más débil puede requerir una medición más sensible, y algunas respuestas tienen la tendencia opuesta a la atracción hacia un campo más fuerte.

La observación cotidiana es real, pero su aparente sencillez de sí o no oculta una gama de propiedades medibles. Algunos metales sostienen una respuesta colectiva fuerte que se acopla eficazmente al campo circundante. Otros responden débilmente o de forma diferente. La explicación pertinente combina interacciones electrónicas, organización del material y geometría del campo en vez de apoyarse en la etiqueta «metal».

Notas técnicas (opcionales)

La atracción requiere una variación espacial

Un dipolo magnético ideal en un campo uniforme experimenta un momento de fuerza salvo que esté orientado adecuadamente, pero ninguna fuerza neta de traslación debida a ese campo uniforme. Para atraer un objeto pequeño hacia el imán, el campo debe variar en la región que ocupa. Por eso, la intensidad del campo y su gradiente responden a preguntas diferentes.

Para una muestra pequeña y débilmente magnética, con susceptibilidad isótropa aproximadamente lineal χ , correcciones desmagnetizantes despreciables y un campo B prescrito en el vacío circundante, una aproximación útil es $F = \chi V \nabla(B^2)/(2\mu_0)$. Aquí, V es el volumen de la muestra y μ_0 la permeabilidad del vacío. Un valor positivo de χ favorece las regiones de campo más intenso; uno negativo favorece las de campo más débil. La

fórmula es un límite ilustrativo de respuesta lineal, no un modelo de un objeto de hierro fuertemente magnetizado en saturación.

El factor de un medio importa para un momento inducido. A medida que el campo aplicado crece desde cero, también crece la magnetización inducida; la energía debe tener en cuenta esa respuesta cambiante. Tratar el momento inducido final como un momento permanente fijo durante todo el proceso daría una expresión incorrecta de la energía. No se obtiene ninguna predicción numérica de fuerza sin conocer la respuesta del material y el mapa espacial del campo.

Referencias

[1] OpenStax. University Physics Volume 2, §12.7, Magnetism in Matter.

<https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-7-magnetism-in-matter>

[2] OpenStax. College Physics 2e, §22.2, Ferromagnets and Electromagnets.

<https://openstax.org/books/college-physics-2e/pages/22-2-ferromagnets-and-electromagnets>

¿Por qué la Luna no cae sobre la Tierra?

La Luna sí cae bajo la gravedad. Lo que evita es chocar con la superficie terrestre. Su movimiento lateral y el cambio continuo producido por la gravedad se combinan en una trayectoria curva alrededor de la Tierra. Caer no tiene por qué significar moverse en línea recta hacia el suelo.

La distinción se aclara al separar rapidez y dirección. Un objeto puede mantener la misma rapidez alrededor de un círculo mientras cambia de dirección durante todo el recorrido. Eso es aceleración. Dos fuerzas que se cancelaran exactamente no la producirían, por lo que una órbita no debería explicarse mediante una cancelación completa que no deja ningún cambio de movimiento.

La sensación de peso puede resultar engañosa aquí. Una báscula responde normalmente a la fuerza que sostiene un cuerpo. Si el cuerpo y la báscula caen juntos, ese apoyo puede hacerse pequeño aunque la gravedad siga acelerando a ambos. La NASA explica la microgravedad orbital mediante esta caída libre compartida, no mediante la ausencia de una gravedad considerable a las alturas de las naves espaciales. [1]

Un modelo de órbita circular hace explícita la relación entre movimiento lateral, distancia y gravedad. Es una idealización que ayuda a explicar el mecanismo, no una descripción completa de la trayectoria lunar. La distancia lunar media que indica la NASA, de unos 384 400 kilómetros, es una magnitud observacional. Un cálculo hipotético cerca de esa escala no es automáticamente una comprobación independiente de precisión de la órbita real. [2]

Poner a prueba una explicación orbital detallada exige comparar posiciones y tiempos predichos con mediciones y sus incertidumbres. El Sol y las desviaciones respecto a un círculo perfecto pertenecen a esa tarea más completa. Explicar por qué es posible una órbita no termina el trabajo de predecirla con precisión.

Por tanto, la Luna no necesita que desaparezca la gravedad ni escapar repetidamente de ella. Su movimiento bajo la gravedad sigue una trayectoria que no intersecta la Tierra. Su cara casi constante es otra pregunta, sobre la rotación y no sobre la mera existencia de una órbita.

Notas técnicas (opcionales)

Caer no especifica toda la trayectoria

Suelta un objeto sin velocidad lateral respecto al centro terrestre y la trayectoria gravitatoria idealizada será radial. Dale una velocidad lateral y sus posiciones posteriores dependerán tanto de esa velocidad como de la gravedad. La fuerza especifica cómo cambia la velocidad; no borra la velocidad que el objeto ya tiene.

Para una órbita circular en el modelo sencillo de un satélite pequeño alrededor de una Tierra esférica, la aceleración gravitatoria es GM/r^2 . Aquí, G es la constante gravitatoria, M la masa terrestre y r la distancia a su centro. El movimiento circular requiere una aceleración hacia dentro v^2/r . Igualar ambas da $v = \sqrt{GM/r}$. Es una condición sobre el movimiento, no un equilibrio entre la gravedad hacia dentro y una segunda fuerza física hacia fuera en un sistema de referencia inercial.

La distinción importa. Dos fuerzas opuestas que se cancelaran exactamente darían una aceleración nula. Una órbita circular tiene aceleración no nula porque la dirección de la

velocidad cambia continuamente. Su rapidez puede permanecer constante mientras su velocidad no lo hace. La explicación de la NASA sobre la microgravedad orbital destaca el punto observacional esencial: la gravedad sigue siendo considerable a las altitudes de las naves espaciales, y los objetos en órbita están en caída libre [1].

Qué predice un cálculo circular y qué no

Consideremos un planeta esférico explícitamente hipotético con parámetro gravitatorio $GM = 4,0 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ y una órbita de radio $r = 4,0 \times 10^8 \text{ m}$. La rapidez circular es 1000 m/s. La aceleración hacia dentro es $0,0025 \text{ m/s}^2$. Dividir la circunferencia $2\pi r$ por la rapidez da un período de aproximadamente 29,1 días.

Son datos elegidos, no un ajuste a observaciones de la Luna. El cálculo muestra que una aceleración pequeña y continua puede producir una trayectoria curva muy grande. No es necesario que la aceleración a esa distancia se parezca a la mucho mayor de un objeto que cae cerca de la superficie terrestre.

La órbita lunar real no es un círculo perfecto, la Tierra no está fija y el Sol también afecta al movimiento. En un tratamiento aislado de dos cuerpos, ambos orbitan alrededor de su centro de masas común. La órbita relativa utiliza $G(M + m)$, donde m es la masa lunar, en vez de suponer que un cuerpo permanece literalmente inmóvil. Predicciones más detalladas añaden perturbaciones y la distribución real de masa de la Tierra.

La NASA da una distancia media de la Luna de unos 384 400 kilómetros [2]. Ese número es una propiedad inferida a partir de observaciones; el ejemplo hipotético anterior es un ejercicio de un modelo. Su proximidad de escala no debe confundirse con una prueba independiente de precisión. Una prueba genuina debe comparar posiciones y tiempos predichos con los medidos, indicando incertidumbres y correcciones.

Referencias

[1] NASA Glenn Research Center. What Is Microgravity?

<https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/glenn/what-is-microgravity/> (consulta: 5 de octubre de 2026).

[2] NASA Science. Moon Facts. <https://science.nasa.gov/moon/facts/> (consulta: 5 de octubre de 2026).

¿Por qué suele haber dos pleamares al día?

Muchas costas experimentan aproximadamente dos pleamares al día. Algunas tienen una marea diaria dominante, y las pleamares sucesivas pueden ser desiguales. Una explicación debe dar cuenta de esas diferencias en vez de prometer dos subidas idénticas en todas partes.

La Luna atrae a la Tierra sólida además de a sus océanos. Lo que importa para las mareas es cómo difiere esa atracción a través del planeta. Si la aceleración fuera idéntica en todas partes, la Tierra y el océano se moverían juntos sin que esa parte uniforme de la atracción tendiera a deformarlos. El forzamiento de marea se refiere a la diferencia entre la aceleración en un lugar y en el centro de la Tierra. [1]

En el patrón elemental, esa diferencia tiene dos lados. El lado cercano es atraído con más fuerza que el centro, mientras que el lejano lo es con menos fuerza. Respecto al centro, el patrón tiende a estirar el sistema a lo largo de la dirección Tierra-Luna. La contribución del lado lejano no requiere fingir que la gravedad lunar empuja el agua hacia fuera.

Al girar la Tierra, los lugares atraviesan el patrón, pero la Luna también se mueve por su órbita. El retorno aproximado a la misma orientación lunar tarda 24 horas y 50 minutos, no exactamente un día solar. Esto proporciona una escala temporal útil, no un horario para todas las orillas. [2]

El agua real responde dentro de cuencas de formas y profundidades diferentes. Los continentes, las conexiones entre masas de agua y la rotación terrestre afectan a la respuesta. La NOAA distingue los patrones observados de dos mareas diarias, mixtos y de una marea diaria, y explica la importancia de esos límites. [3] No se puede tratar el océano como un par de bultos rígidos simplemente transportados alrededor del planeta.

La influencia lunar de dos lados explica por qué es común una componente de dos mareas diarias. Predecir la pleamar en una costa concreta requiere la dinámica de ese océano junto con los otros forzamientos. La geometría sencilla es un punto de partida cuyos límites forman parte de la respuesta.

Notas técnicas (opcionales)

La fuerza pertinente es una diferencia

La Luna atrae a la Tierra en su conjunto, incluidos su interior sólido y sus océanos. Si esa atracción fuera exactamente igual en todas partes, todo el sistema aceleraría conjuntamente sin que el campo lunar tendiera a deformarlo. El forzamiento de marea surge porque el campo gravitatorio de la Luna cambia a lo largo de la extensión terrestre [1].

El lado próximo está más cerca de la Luna y acelera hacia ella con mayor intensidad que el centro terrestre. El lado lejano está más lejos y acelera hacia ella con menor intensidad. Respecto al centro que acelera, el efecto del lado próximo apunta hacia la Luna y el del lado lejano apunta en sentido contrario. Esto último no significa que la gravedad se vuelva repulsiva. Es la diferencia entre dos aceleraciones atractivas.

Para una masa lunar M , una distancia entre centros d y un desplazamiento pequeño x sobre la línea Tierra-Luna, un desarrollo de primer orden da una aceleración relativa de aproximadamente $2GMx/d^3$. El signo sigue a x : los lados opuestos se estiran alejándose

del centro a lo largo de esa línea. El desarrollo supone que $|x|$ es mucho menor que d ; no es una fórmula exacta para cualquier separación.

Esto también explica una relación de escala útil. La influencia principal de marea varía aproximadamente como el inverso del cubo de la distancia, mientras que la aceleración gravitatoria ordinaria de una masa puntual varía como el inverso del cuadrado. Por tanto, comparar los efectos de marea de dos cuerpos requiere tanto sus masas como sus distancias, utilizando la potencia adecuada. La atracción gravitatoria total más intensa no tiene por qué proporcionar el mayor gradiente generador de mareas.

Por qué el patrón sencillo tiene dos lados

Tras retirar la aceleración uniforme del centro terrestre, el término principal del potencial generador de mareas tiene una dependencia angular proporcional a $3 \cos^2 \theta - 1$, donde θ es el ángulo respecto a la línea Tierra-Luna. Sus valores iguales en $\theta = 0$ y $\theta = \pi$ expresan su carácter de dos lados. Es una afirmación matemática sobre el patrón gravitatorio principal, anterior a la pregunta de cómo responde el agua del mar.

Imaginemos un océano ideal en equilibrio y un lugar en el ecuador, con la Luna también en el plano ecuatorial terrestre. La rotación lleva ese lugar por las dos direcciones alineadas durante un día lunar. De ahí resulta una variación de dos ciclos por día lunar. La simetría geométrica, no dos tipos distintos de fuerza gravitatoria, es la razón de que la imagen sencilla tenga dos máximos.

Esa construcción suprime deliberadamente complicaciones importantes. En otras latitudes y declinaciones lunares, el recorrido por el patrón difiere. El agua real no puede adoptar instantáneamente una forma de equilibrio. Los continentes interrumpen el movimiento y el océano en rotación tiene su propia dinámica. El dibujo de dos abultamientos introduce el forzamiento, pero no es un mapa móvil de la pleamar real en cada costa.

Referencias

- [1] OpenStax. University Physics, Volume 1, §13.6, Tidal Forces.
<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-6-tidal-forces> (consulta: 6 de octubre de 2026).
- [2] NOAA National Ocean Service. Tides and Water Levels: The Lunar Day.
https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/tides05_lunarday.html (consulta: 5 de octubre de 2026).
- [3] NOAA National Ocean Service. Types and Causes of Tidal Cycles.
https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/tides07_cycles.html (consulta: 5 de octubre de 2026).

¿Por qué el verano no se debe a estar más cerca del Sol?

El verano septentrional y el invierno meridional ocurren al mismo tiempo. Ambos hemisferios pertenecen a la misma Tierra, esencialmente a la misma distancia del Sol. Esa observación basta para mostrar por qué la distancia por sí sola no puede explicar sus estaciones opuestas.

El eje terrestre está inclinado respecto al plano orbital y su dirección permanece aproximadamente fija a lo largo de un año. Durante una parte de la órbita, el hemisferio norte se orienta más hacia el Sol; durante la parte opuesta, lo hace el hemisferio sur. La inclinación cambia conjuntamente la altura del Sol en el cielo y la duración de la luz diurna. [1]

Un Sol más bajo distribuye la energía de un haz sobre una superficie mayor. Una menor duración del día también reduce el tiempo disponible para recibir energía. Por tanto, los ángulos más favorables y los días más largos del verano actúan juntos. Preguntar solo cuánta potencia tiene el Sol pasa por alto cómo se distribuye su luz sobre una Tierra inclinada que gira.

La distancia sí tiene un efecto. La órbita terrestre es ligeramente elíptica, con su máxima aproximación alrededor de enero y su mayor distancia alrededor de julio. Ese calendario es el contrario del que necesitaría una explicación basada solo en la distancia para el verano septentrional. [1] El principio físico correcto de que la distancia afecta a la irradiancia se ha aplicado simplemente al patrón equivocado.

Las temperaturas locales no están determinadas solo por la geometría de la luz diurna. El almacenamiento de calor, el transporte y las condiciones superficiales influyen en la respuesta, de modo que el momento más cálido no tiene por qué coincidir exactamente con el forzamiento astronómico más intenso. Explicar la causa de las estaciones es diferente de predecir la temperatura de cada lugar.

Una explicación útil debe dar cuenta de ambos hemisferios y de los cambios coordinados de duración del día y ángulo solar. La inclinación terrestre lo hace. La distancia modifica la energía disponible, pero no puede proporcionar la inversión que falta entre norte y sur.

Notas técnicas (opcionales)

El mismo haz puede repartirse sobre más suelo

Imaginemos un haz con potencia F por unidad de superficie medida sobre un plano perpendicular a su dirección. Si un área receptora horizontal está inclinada respecto a ese haz de modo que el ángulo cenital del Sol sea z , la potencia incidente por unidad de superficie horizontal es $F \cos z$. El ángulo cenital se mide desde la vertical hacia arriba: la luz del Sol situado justo encima tiene $z = 0$.

El coseno es un factor de proyección. No significa que cada fotón se vuelva intrínsecamente más débil cuando el Sol está más bajo. El mismo haz se reparte sobre una superficie horizontal mayor. La absorción atmosférica, la dispersión y las nubes pueden modificar después lo que llega a la superficie, pero la proyección geométrica existe antes de introducir esas complicaciones.

Para una latitud ilustrativa de 45° norte y una inclinación del eje elegida de $23,5^\circ$, los ángulos cenitales ideales del mediodía solar en los dos solsticios son $21,5^\circ$ y $68,5^\circ$. Sus factores coseno son aproximadamente 0,930 y 0,367. Con un flujo entrante idéntico y sin efectos atmosféricos, el valor del mediodía de verano es unas 2,54 veces el del mediodía de invierno.

Este cálculo es deliberadamente local e instantáneo. No predice que la temperatura del aire en verano sea 2,54 veces la de invierno. La temperatura depende del almacenamiento y la transferencia de energía y, en cualquier caso, las razones sobre la escala Celsius serían físicamente inadecuadas para esa afirmación. Lo que establece el cálculo es la magnitud de una diferencia geométrica en la potencia recibida.

El Sol también permanece más tiempo sobre el horizonte

Sean φ la latitud y δ la declinación del Sol, su posición angular al norte o al sur del ecuador celeste. Para una Tierra esférica y un Sol puntual, el ángulo horario al amanecer o al atardecer satisface $\cos H = -\tan \varphi \tan \delta$. Ignorando la refracción y el tamaño aparente finito del Sol, la duración de la luz diurna es $24H/\pi$ horas cuando H se expresa en radianes.

A 45° norte, utilizar $\delta = +23,5^\circ$ da unas 15,4 horas de luz. Con $\delta = -23,5^\circ$, el resultado es unas 8,6 horas. Así, la estación con el Sol más alto al mediodía también proporciona un intervalo mayor durante el que puede llegar energía solar. Integrar el factor de proyección variable durante las horas de luz da la exposición diaria; multiplicar la potencia del mediodía por la duración del día sería solo un atajo aproximado.

La fórmula tiene límites que revelan física útil. Para algunas combinaciones de latitud y declinación, su miembro derecho queda fuera del intervalo de -1 a $+1$. Entonces no hay un amanecer o atardecer ordinario en este modelo ideal: el Sol permanece sobre el horizonte o bajo él todo el día. Es una condición geométrica, no un fallo de la trigonometría.

Ni una fecha del calendario ni la palabra verano determinan por sí solas la exposición diaria local. Importan la latitud, la posición orbital y las condiciones del horizonte. El cálculo ideal aísla dos mecanismos sólidos, el ángulo y la duración, y deja los efectos atmosféricos y geográficos para una descripción más completa.

Referencias

[1] NASA Space Place. What Causes the Seasons? <https://spaceplace.nasa.gov/seasons/en/> (consulta: 5 de octubre de 2026).

¿Por qué la Luna nos muestra casi siempre la misma cara?

Un rostro familiar puede ocultar una rotación. La Luna presenta casi el mismo hemisferio a la Tierra, lo que invita a imaginar que no gira. Pero imagina que caminas alrededor de una silla manteniendo el rostro orientado hacia ella. Cuando completes la vuelta, también habrás girado una vez respecto a la habitación. La Luna hace ese tipo de giro respecto al espacio lejano. Su rotación y su órbita tienen períodos coincidentes. [1]

Esa coincidencia tiene una historia física. La gravedad actúa de forma diferente en distintos puntos de un cuerpo extenso y lo deforma. Si la deformación no permanece exactamente alineada con el cuerpo que ejerce la fuerza, la gravedad puede ejercer un momento de fuerza. En un cuerpo disipativo, parte de la energía mecánica se convierte en calor. Con el tiempo, esa combinación puede modificar la rotación y llevarla a una relación estable con la órbita. Esta es la base del acoplamiento de marea, no una exigencia de que todas las lunas deban mostrar siempre la misma cara. [2]

Una explicación sencilla suele representar una órbita circular y una Luna que gira a velocidad constante. La geometría real es menos regular. La Luna avanza a distintas velocidades por su órbita elíptica, mientras que su rotación es más uniforme. Su eje también está inclinado. Estas diferencias permiten ver un poco más allá de los bordes del hemisferio familiar en distintos momentos. Ese balanceo aparente se llama libración. [3]

La libración hace que «la misma cara» sea una aproximación y no una descripción exacta de una imagen inmóvil. No significa que la Luna deje de girar y vuelva a hacerlo. Tampoco significa que la cara oculta nunca reciba luz solar. La distinción se refiere a la dirección hacia la Tierra, no a una división permanente entre luz y oscuridad.

Un modelo de disipación de marea explica cómo puede desarrollarse una relación entre rotación y órbita, pero no proporciona un tiempo preciso de acoplamiento sin más supuestos sobre el interior y la historia del cuerpo. El movimiento actual y la explicación histórica responden, por tanto, a preguntas diferentes. Podemos describir la rotación sincrónica sin pretender conocer cada etapa que la produjo.

El cambio de perspectiva útil consiste en preguntar: ¿movimiento respecto a qué? Respecto al espacio lejano, la Luna gira. Respecto a la línea dirigida hacia la Tierra, su orientación cambia poco. Ambas afirmaciones son compatibles. La cara lunar familiar constituye evidencia de una rotación particular, no de la ausencia de rotación.

Referencias

[1] NASA Science. The Moon's Rotation. <https://science.nasa.gov/resource/the-moons-rotation/> (consulta: 5 de octubre de 2026).

[2] NASA Science. Tidal Locking. <https://science.nasa.gov/moon/tidal-locking/> (consulta: 5 de octubre de 2026).

[3] NASA Science. Moon Essentials from NASA's Scientific Visualization Studio. <https://science.nasa.gov/resource/moon-essentials-from-nasas-scientific-visualization-studio/> (consulta: 5 de octubre de 2026).

¿Cómo puede una nube mantenerse en el aire?

Una nube parece un objeto suspendido en el aire. Sin embargo, su material visible consiste en pequeñas gotas de agua líquida, partículas de hielo o ambas. El vapor de agua en sí es invisible. El primer paso para explicar una nube consiste, por tanto, en separar el gas de las partículas condensadas que dispersan la luz y hacen visible la nube. [1]

Esas partículas tienen peso. Lo que distingue una gotita de una gota de lluvia grande no es una exención de la gravedad, sino el equilibrio entre su peso y la resistencia del aire circundante. Una gotita puede caer muy despacio respecto a ese aire. Un modelo sencillo de una esfera pequeña que se mueve por un fluido muestra por qué el tamaño importa tanto; sus supuestos y su cálculo se presentan en las notas técnicas. [2]

El aire también se mueve. Una corriente ascendente puede transportar hacia arriba una partícula que cae lentamente, mientras que una corriente más débil quizá solo reduzca su movimiento descendente. El movimiento visto desde el suelo combina el movimiento de la partícula respecto al aire y el del aire respecto al suelo. Ninguno de los dos componentes describe por sí solo toda la nube.

Hay otra razón para no imaginar una nube como una bolsa fija de gotas. El enfriamiento del aire puede producir condensación, mientras que el calentamiento o la mezcla con aire más seco puede evaporar las gotas. El material visible puede aparecer en una parte de la nube y desaparecer en otra. Una forma persistente no tiene por qué contener las mismas partículas durante toda su existencia. [1]

La precipitación requiere una parte adicional de la explicación. Las partículas pueden crecer mediante procesos que implican colisiones, coalescencia o hielo, y su capacidad para caer a través del aire circundante cambia a medida que crecen. Las condiciones que mantienen una nube no son, por tanto, idénticas a las que producen lluvia o nieve. [1]

Una nube sigue siendo visible porque el movimiento y la formación continua pueden mantener una población de partículas. Las partículas individuales pueden descender aunque la nube parezca permanecer en el mismo lugar. Preguntar por qué no cae la nube resulta más útil cuando preguntamos por separado cómo se mueven sus partículas, cómo crecen y cómo se renuevan.

Notas técnicas (opcionales)

Las gotas pequeñas tienen velocidades de caída pequeñas

Una gota que cae experimenta gravedad, empuje y resistencia aerodinámica. Tras un breve ajuste, la resistencia puede equilibrar su peso efectivo, dando una velocidad terminal respecto al aire. «Terminal» no significa que la gota se haya detenido; significa que su rapidez de caída ya no aumenta en las condiciones declaradas.

Para una partícula esférica pequeña que se mueve lentamente por un fluido viscoso, la ley de Stokes da una resistencia de magnitud $6\pi\eta r v$, donde η es la viscosidad dinámica, r el radio de la partícula y v la rapidez respecto al fluido [2]. Igualarla al peso efectivo, $(4\pi r^3/3)(\rho_w - \rho_a)g$, da $v = 2(\rho_w - \rho_a)gr^2/(9\eta)$. Aquí, ρ_w y ρ_a son las densidades del agua y del aire, y g es la aceleración gravitatoria.

La dependencia con el cuadrado del radio es el resultado crucial. El peso es proporcional al volumen, por tanto a r^3 , mientras que esta resistencia a baja velocidad es proporcional a r . Así, las partículas pequeñas alcanzan el equilibrio a una rapidez baja. La fórmula es una aproximación de bajo número de Reynolds para una esfera aislada, no una ley para todas las gotas de lluvia, cristales de hielo o interacciones turbulentas.

Utilicemos datos ilustrativos próximos a la superficie: $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ y $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Un radio de 10 micrómetros da entonces unos 0,0121 m/s, o 1,21 centímetros por segundo. Son datos especificados de un modelo, no una medición de cada gota de una nube.

El número de Reynolds asociado, $\rho_a v(2r)/\mu$, es aproximadamente 0,016, compatible con utilizar la aproximación de flujo lento. Duplicar el radio da cuatro veces la rapidez del modelo, unos 0,0484 m/s, y un número de Reynolds próximo a 0,13. A medida que las partículas crecen más, resulta inadecuado extrapolar la misma fórmula sin comprobar su régimen.

Caer a través del aire no significa necesariamente caer hacia el suelo

La velocidad respecto al aire difiere de la velocidad respecto al suelo. Si el aire asciende más deprisa de lo que una gota cae a través de él, la gota asciende respecto al suelo. Si el ascenso es más débil, la gota puede seguir descendiendo, pero despacio. Una nube no necesita contener una fuerza que cancele directamente la gravedad para cada partícula.

Para el ejemplo de 10 micrómetros, una velocidad ascendente hipotética del aire de 0,020 m/s superaría la rapidez de caída calculada. En esta comparación estacionaria sencilla, la velocidad vertical neta de la gota sería de unos 0,0079 m/s hacia arriba. Es una ilustración de suma de velocidades, no una afirmación de que una nube concreta tenga esa corriente ascendente uniforme.

En aire perfectamente inmóvil, la misma velocidad terminal requeriría unas 2,3 horas para caer 100 metros. Ese cálculo no establece la duración de una nube. Las gotas reales pueden evaporarse, crecer, colisionar o entrar en movimientos de aire diferentes durante ese intervalo. Solo demuestra por qué una partícula pequeña que cae no abandona inmediatamente una nube de gran espesor.

El empuje también necesita una formulación cuidadosa. Una gota líquida es mucho más densa que el aire y no flota individualmente como un globo de helio. El movimiento por flotabilidad de una parcela de aire húmedo es otro asunto, que implica la densidad de la parcela respecto a su entorno. La nube puede estar asociada a aire ascendente aunque sus gotas tengan velocidades de caída hacia abajo respecto a ese aire.

Referencias

- [1] US National Weather Service. Cloud Development.
https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/clouds/cloud_development/clouds.htm
 (consulta: 5 de octubre de 2026).
- [2] OpenStax. University Physics, Volume 1, §6.4, Drag Force and Terminal Speed.
<https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-4-drag-force-and-terminal-speed>
 (consulta: 5 de octubre de 2026).

¿Por qué los rayos siguen trayectorias ramificadas?

Un canal de rayo puede parecer una línea bifurcada trazada en el cielo. La imagen invita a una explicación engañosa: la electricidad encontró un camino ya preparado y lo siguió. En realidad, la vía conductora se crea a medida que se desarrolla la descarga. El aire, que era un mal conductor, pasa a formar parte de una trayectoria ionizada y cambiante. [1,3]

En una forma común de rayo negativo de nube a tierra, un líder avanza por pasos. Pueden desarrollarse descargas ascendentes desde objetos próximos al suelo, y una conexión permite el brillante golpe de retorno. Esa secuencia es útil, pero no describe todos los tipos de rayos. La pregunta sobre la ramificación concierne al crecimiento de la descarga y también a la corriente que después circula por su canal. [1,2]

A menor escala, los «streamers» son frentes de ionización cuyos campos eléctricos contribuyen a impulsar su propio avance. Un «streamer» no es simplemente otro nombre para el líder de mayor tamaño. Distinguir estas estructuras importa porque una explicación de la ramificación a una escala no explica automáticamente todo el rayo. [3]

Un estudio combinó experimentos con un modelo tridimensional de «streamers» positivos. Los aspectos aleatorios de la fotoionización contribuyeron a producir ramificaciones, y las estadísticas de ramificación simuladas concordaron con las mediciones en las condiciones estudiadas. Esa afirmación es más fuerte que limitarse a dibujar una forma ramificada, pero más acotada que reproducir una tormenta. [4]

Los investigadores comparan modelos con imágenes de alta velocidad, mediciones eléctricas y otras observaciones. Los modelos deben dar cuenta de las condiciones en las que crece un canal, no solo del aspecto final de una fotografía. Siguen abiertas preguntas sobre el inicio de los rayos y sobre cómo se conectan los procesos a distintas escalas. [3,4]

La expresión «camino de menor resistencia» puede ocultar toda esa actividad. Puede describir una vía conductora ya establecida, pero no explica por sí sola cómo se formaron las ramas que competían entre sí. Los rayos se ramifican porque la descarga modifica su entorno mientras crece. Qué mecanismo concreto domina depende del tipo de descarga y de las condiciones investigadas.

Notas técnicas (opcionales)

Un pequeño modelo electrostático y su límite

Un cálculo sencillo explica por qué puede importar la geometría sin pretender calcular un rayo. Para una esfera conductora aislada en equilibrio electrostático, el potencial respecto al infinito es $V = kQ/r$ y el campo superficial es $E = kQ/r^2$. Aquí, Q es la carga, r el radio y k la constante electrostática. Dividir da $E = V/r$.

Dentro de esta idealización, dos esferas mantenidas al mismo potencial tienen campos superficiales diferentes: reducir el radio a la mitad duplica el campo. La comparación se hace a potencial fijo, no a carga fija. A carga fija, reducir el radio a la mitad multiplicaría el campo por cuatro. Especificar qué permanece fijo forma parte de la explicación.

Ninguno de los resultados convierte un líder en una colección de esferas aisladas. Su carga cambia, hay otros canales próximos y la ionización modifica el medio circundante. El cálculo solo aporta una razón física por la que una diferencia de voltaje no puede determinar por sí sola el comportamiento local de una descarga. También importan la geometría y la distribución local de carga. Un campo medio entre nube y suelo no sustituye las condiciones de cada punta que avanza.

Referencias

- [1] National Weather Service. Understanding Lightning: Initiation of a Stepped Leader. <https://www.weather.gov/safety/lightning-science-initiation-stepped-leader>
- [2] National Weather Service. Understanding Lightning: Connection with the Ground. <https://www.weather.gov/safety/lightning-science-connection-ground>
- [3] S. Nijdam, J. Teunissen and U. Ebert. The physics of streamer discharge phenomena. Plasma Sources Science and Technology 29, 103001 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05>
- [4] Z. Wang, S. Dijcks, Y. Guo, M. van der Leegte, A. Sun, U. Ebert, S. Nijdam and J. Teunissen. Quantitative modeling of streamer discharge branching in air. Plasma Sources Science and Technology 32, 085007 (2023). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ace9fa> Manuscrito del autor en acceso abierto: <https://arxiv.org/abs/2208.07279>

¿Por qué el océano es salado y la lluvia no?

El agua de mar contiene iones disueltos, entre ellos sodio y cloruro. Una salinidad típica es de unos treinta y cinco gramos de sales disueltas por kilogramo de agua de mar. Los ríos contribuyen a aportar material disuelto liberado durante la meteorización de las rocas. Pero una entrada explica solo una parte del balance de sales del océano. [1]

La cantidad que llega por un río depende tanto de la concentración del agua como del caudal. Un arroyo pequeño y concentrado puede aportar menos material que un río grande y diluido. Esa distinción entre concentración y aporte total es una cuestión sencilla de contabilidad, y el ejemplo numérico de las notas explicita sus supuestos.

El océano también tiene salidas e intercambios. En los sistemas hidrotermales, el agua de mar reacciona con roca caliente; algunas sustancias se retiran del agua y otras se añaden. El magnesio y el sulfato no se comportan igual que los metales aportados por estas reacciones. Una explicación útil sigue, por tanto, iones concretos, en vez de tratar toda la «sal» como una sustancia con una única historia. [2]

La evaporación retira agua y deja las sales disueltas, lo que ayuda a explicar las diferencias de salinidad. El aerosol marino es un proceso distinto: transporta gotas y sal a la atmósfera. El agua de lluvia tampoco está químicamente vacía; sus interacciones con gases como el dióxido de carbono afectan a su química. Estas vías no deben reducirse a la afirmación única de que el agua se va y la sal siempre permanece. [3-5]

La incorporación biológica también necesita una escala temporal. Que un ion pase a un organismo no demuestra por sí solo que haya abandonado permanentemente el sistema oceánico. Puede regresar cuando el material se descomponga. Para establecer una retirada duradera, debemos seguir lo que sucede después y definir la frontera respecto a la cual se contabiliza esa retirada.

El mar es salado por el balance y la historia de sus entradas, salidas y movimientos de agua. No basta con explicarlo como un recipiente que recibe sales para siempre y nunca pierde ninguna. El mismo principio contable se aplica a un lago o a un recipiente de laboratorio: una concentración es un estado que hay que explicar, mientras que un balance describe los procesos que lo modifican.

Notas técnicas (opcionales)

Un cálculo de concentración

Consideremos un recipiente deliberadamente simplificado con 1000 kilogramos de disolución, incluidos 35 kilogramos de sales disueltas no volátiles. Su fracción másica de sal es $35/1000 = 0,035$, o 35 gramos por kilogramo. Supongamos que se evaporan 100 kilogramos de agua, sin pérdida de sal ni entrada de material nuevo.

La disolución restante tiene una masa de 900 kilogramos y sigue conteniendo 35 kilogramos de sal. Por tanto, su concentración es $35/900$, aproximadamente 0,0389, o 38,9 gramos por kilogramo. La cantidad total de sal no ha crecido. Solo ha disminuido la cantidad total de agua.

Si después se añaden 100 kilogramos de agua sin sal, vuelve la concentración original. Este cálculo simplificado aísla la dilución y la concentración; no reconstruye una cuenca oceánica. Desprecia la circulación, los solutos adicionales, las reacciones químicas, la precipitación de minerales y el intercambio con sedimentos. Tampoco equipara gramos

por kilogramo con gramos por litro: masa y volumen requieren una conversión mediante la densidad.

De ahí se deduce una segunda distinción. El agua puede pasar de un río a un océano y salir después por evaporación, mientras que el material disuelto sigue otro conjunto de rutas. Un diagrama del ciclo del agua que solo siga al agua es incompleto como diagrama del transporte de sal.

Por qué la sal no se acumula sin límite

Para un componente disuelto elegido, sea M su masa en el océano, F_{in} su tasa total de entrada y F_{out} su tasa total de retirada. La conservación da $dM/dt = F_{in} - F_{out}$. La ecuación no dice por sí sola nada sobre las magnitudes de esos flujos; para conocerlas hacen falta química y mediciones.

Las reacciones entre agua y roca en el fondo marino pueden retirar magnesio y sulfato, y los minerales pueden precipitar de los fluidos hidrotermales. [2] La incorporación biológica puede transferir algunos componentes fuera del agua del mar. [1] Esa transferencia por sí sola no establece una retirada permanente: la descomposición o disolución posteriores pueden devolver el material. Un sumidero químico debe definirse sobre una escala temporal y con un destino.

Si las entradas y salidas se equilibran durante un intervalo elegido, la cantidad almacenada puede permanecer aproximadamente estable pese al tránsito continuo de material. Bajo esa aproximación de estado estacionario, M/F_{out} define una escala temporal de renovación del componente elegido. No es la edad del océano ni establece la edad de cada ion que contiene. Los distintos elementos pueden tener cantidades almacenadas y procesos de retirada muy diferentes.

Esto importa históricamente. Dividir el contenido actual de sal del océano por el aporte actual de los ríos produciría un tiempo, pero interpretarlo como la edad del océano supondría ignorar las salidas, los cambios de los aportes y las condiciones iniciales. Un cociente dimensionalmente válido no es automáticamente un reloj válido.

Referencias

- [1] NOAA National Ocean Service. Why is the ocean salty?
<https://oceanservice.noaa.gov/facts/whysalty.html>
- [2] NOAA Ocean Exploration. Factsheet: Hydrothermal Vents.
<https://oceanexplorer.noaa.gov/wp-content/uploads/2022/10/hydrothermal-vents-fact-sheet.pdf>
- [3] NOAA JetStream. Sea Water. <https://www.noaa.gov/jetstream/ocean/sea-water>
- [4] US Geological Survey. Why is the Ocean Salty?
<https://www.usgs.gov/water-science-school/science/why-ocean-salty>
- [5] NOAA. Aerosols, Weather and Climate. State of the Science Fact Sheet (agosto de 2022).
<https://csl.noaa.gov/factsheets/aerosolsweatherclimatesos.pdf>

¿Por qué se encuentran fósiles marinos en lo alto de las montañas?

Un fósil marino en lo alto de una montaña registra un ambiente, no una altitud. El animal vivía en el agua cuando se depositó el sedimento que lo rodeaba. Su altura actual nos dice que el entorno ha cambiado desde entonces. Conectar ambas observaciones requiere evidencia sobre las rocas y sus movimientos posteriores.

La región de la cordillera Teton ofrece un ejemplo concreto. Las formaciones sedimentarias contienen restos asociados a ambientes marinos, entre ellos algas, corales, braquiópodos y trilobites. Los distintos estratos registran entornos diferentes. Las areniscas, las calizas y las lutitas no representan todas la misma profundidad ni las mismas condiciones, y las rocas cristalinas más antiguas situadas bajo la cubierta sedimentaria tienen a su vez una historia diferente. [1,2]

El sedimento puede enterrar restos, convertirse en roca y quedar después expuesto por la erosión. Un fósil todavía incluido en un estrato identificable resulta especialmente informativo porque su entorno ayuda a establecer la secuencia. Un ejemplar suelto encontrado en una ladera requiere más cautela: su posición actual puede no ser el lugar donde se formó el sedimento que lo contenía. [1]

La formación de montañas cambia después la geometría. En la cordillera Teton, las fallas normales asociadas a la extensión son fundamentales para el contraste entre la cordillera que se eleva y el valle adyacente. Esto recuerda que no todas las montañas se forman mediante el mismo proceso de compresión. Una etiqueta amplia como «levantamiento» debe vincularse a una historia geológica concreta. [3]

Tampoco es la diferencia actual de elevación una medida directa del desplazamiento total a lo largo de una falla. La erosión retira material y los sedimentos rellenan las zonas bajas. El paisaje refleja esos procesos además del movimiento de la corteza. Reconstruir la historia requiere varias clases de evidencia, no una sola medida del relieve actual. [2,3]

El fósil no muestra que la montaña fuera antes una montaña bajo el mar. Muestra que el material de la roca pasó por un ambiente marino antes de llegar a su paisaje actual. El razonamiento geológico separa esas etapas y comprueba cómo encajan.

Referencias

[1] National Park Service, Grand Teton National Park. Fossils.

<https://www.nps.gov/grte/learn/nature/fossils.htm>

[2] National Park Service, Grand Teton National Park. Geologic Activity.

<https://www.nps.gov/grte/learn/nature/geology.htm>

[3] National Park Service, Grand Teton National Park. Teton Fault.

<https://www.nps.gov/grte/learn/nature/faults.htm>

¿Por qué es tan difícil predecir un terremoto?

Una alerta temprana de terremoto, un pronóstico y una predicción no son promesas intercambiables. Una predicción precisa a corto plazo tendría que identificar cuándo, dónde y de qué magnitud será un terremoto. Una probabilidad para un intervalo más largo responde a otra pregunta. Separar esas promesas es esencial para juzgar si un método ha tenido éxito. [1,3]

Después de un terremoto destructivo, los acontecimientos anteriores pueden adquirir la apariencia de indicios. La dificultad es que un precursor propuesto también debe evaluarse cuando no le sigue ningún terremoto. Un método útil debe someterse a una evaluación prospectiva que cuente tanto los sucesos no anticipados como las falsas alarmas. Seleccionar a posteriori solo los casos que parecen acertados no permite establecer una predicción fiable. [1]

Aun así, los geólogos pueden aprender mucho sobre el pasado de una falla. La excavación de zanjas puede exponer evidencia de rupturas anteriores, como ilustran los trabajos en la falla de Teton. Esos registros ayudan a reconstruir la actividad, pero una secuencia de sucesos pasados no convierte la falla en un reloj cuyo próximo tic se conoce. Importan tanto el carácter incompleto del registro como su variabilidad. [2]

El pronóstico puede expresar ese conocimiento en términos probabilísticos. Un pronóstico de réplicas, por ejemplo, se refiere a la probabilidad de nuevos terremotos después de un suceso. No identifica la siguiente sacudida exacta. Una probabilidad puede ser científicamente útil aunque no pueda decirle a una persona exactamente qué ocurrirá un día concreto. [3]

La alerta temprana es algo distinto. Comienza después de iniciarse la ruptura y aprovecha que la información llega antes que las sacudidas más fuertes a algunos lugares. Su margen de actuación depende del tiempo y de la distancia. Llamarla predicción oculta tanto su funcionamiento como la razón por la que el tiempo de aviso puede ser muy limitado. [3]

La ausencia de una predicción exacta fiable no significa que no exista ciencia de los terremotos. La evidencia respalda varias clases de inferencia, cada una con un alcance definido. La pregunta importante no es solo si los científicos «pueden predecir terremotos», sino qué resultado, lugar e intervalo temporal abarca realmente una afirmación concreta.

Referencias

[1] US Geological Survey. Can you predict earthquakes?

<https://www.usgs.gov/faqs/can-you-predict-earthquakes>

[2] National Park Service, Grand Teton National Park. Teton Fault.

<https://www.nps.gov/grte/learn/nature/faults.htm>

[3] US Geological Survey. What is the difference between earthquake early warning, earthquake

forecasts, earthquake probabilities, and earthquake prediction? <https://www.usgs.gov/faqs/what-difference-between-earthquake-early-warning-earthquake-forecasts-earthquake-probabilities>

¿Cómo podemos estimar el clima futuro sin conocer el tiempo de cada día?

El tiempo meteorológico se refiere a la secuencia de condiciones que experimentamos. El clima se refiere a patrones y distribuciones a lo largo del tiempo. Perder el seguimiento de la secuencia exacta no vuelve incognoscibles todas las características estadísticas. Por eso la incertidumbre sobre un día futuro concreto no invalida por sí sola una proyección de cambio climático.

Una proyección pregunta qué se sigue de unas condiciones especificadas. Esas condiciones incluyen escenarios de influencias futuras sobre el clima; no todos son predicciones de que ocurrirá un futuro particular. Las comparaciones entre observaciones y simulaciones, junto con las proyecciones bajo escenarios ilustrativos, ayudan a hacer visible esa estructura condicional. [2]

La incertidumbre entra por más de una vía. Distintas condiciones iniciales revelan la variabilidad interna. Distintos modelos representan los procesos de forma diferente. Distintos escenarios describen entradas futuras diferentes. Tratar la dispersión entre resultados como un error indiferenciado hace perder información sobre qué podría reducirla y qué no puede resolverse solo con un modelo mejor. [1]

La importancia relativa de esas incertidumbres también cambia con la pregunta. La variabilidad interna es especialmente relevante para algunos resultados regionales y a corto plazo. Otras incertidumbres conciernen a las respuestas de los modelos o al forzamiento futuro. La evaluación de las precipitaciones, por ejemplo, debe considerar las diferencias entre modelos y las influencias de factores como los aerosoles. [1,2]

Las notas técnicas emplean ejemplos simplificados para distinguir la relajación hacia un estado modificado de la trayectoria exacta que se sigue hasta él, y una probabilidad cambiante de la predicción de un suceso concreto. Estos ejemplos explican la lógica. Sus valores ilustrativos no establecen cómo cambiará el clima de la Tierra.

Una afirmación climática útil especifica, por tanto, su variable, región, intervalo y supuestos. Distingue una proyección condicional de un pronóstico incondicional sin sugerir que el conocimiento condicional esté vacío. Podemos disponer de evidencia considerable sobre una distribución cambiante y, a la vez, ser incapaces de describir el tiempo meteorológico de una fecha lejana.

Notas técnicas (opcionales)

Qué puede hacer un cambio de las condiciones de contorno

Un modelo deliberadamente pequeño concreta la distinción. Sea T una anomalía de temperatura global, C una capacidad calorífica efectiva por unidad de superficie, F un desequilibrio energético impuesto y λ un coeficiente restaurador positivo. Escribamos $C \frac{dT}{dt} = F - \lambda T$. Es una ilustración de balance energético de una sola caja, no un modelo climático completo.

Las unidades deben concordar. Si C se mide en julios por metro cuadrado y kelvin, dT/dt en kelvin por segundo, F en vatios por metro cuadrado y λ en vatios por metro cuadrado y kelvin, ambos miembros describen una transferencia de energía por superficie y tiempo.

Con F constante y bajo este supuesto de respuesta lineal, la anomalía de equilibrio es $T_{eq} = F/\lambda$. Partiendo de una anomalía T_0 , la solución es $T(t) = F/\lambda + (T_0 - F/\lambda) \exp(-t/\tau)$, donde $\tau = C/\lambda$. La condición inicial afecta al acercamiento, mientras que el desequilibrio impuesto y el coeficiente restaurador determinan el equilibrio en este modelo.

Podemos, por tanto, calcular un cambio condicional del estado a largo plazo del modelo sin asignar un patrón de nubes a un martes futuro. El cálculo no demuestra los valores de F , C o λ , y deja fuera la estructura espacial, las múltiples escalas temporales oceánicas y las respuestas no lineales. Su propósito es mostrar la lógica de la pregunta, incluidos los supuestos que hacen posible esta respuesta concreta.

Un promedio cambiado puede cambiar la frecuencia de un umbral

Consideremos una segunda ilustración, sin pretensión de describir una ciudad concreta. Supongamos que las temperaturas diarias de una estación elegida siguen una distribución normal con media de 15 °C y desviación típica de 3 °C. Un umbral de 21 °C está dos desviaciones típicas por encima de la media. Bajo esa distribución, aproximadamente el 2,3 % de los días lo supera.

Desplacemos ahora la media a 17 °C, manteniendo fijas la desviación típica y la forma de la distribución. El mismo umbral queda a 4/3 desviaciones típicas por encima de la nueva media, y la fracción que lo supera es aproximadamente del 9,1 %. No ha hecho falta la temperatura de ningún día futuro individual para calcular ninguna de las dos fracciones.

Los supuestos hacen una parte importante del trabajo. Las distribuciones reales de temperatura no tienen por qué ser exactamente normales, y su varianza o su forma pueden cambiar. El ejemplo demuestra cómo puede responder una frecuencia a una distribución modificada; no estima una tendencia regional real de olas de calor. También se refiere a superaciones individuales de un umbral, no a la duración de secuencias de días calurosos, que depende además de relaciones temporales.

Referencias

[1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Capítulo 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-4/>

[2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, especialmente la figura SPM.5 y el apartado C.1.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/>

¿Por qué los ríos forman curvas?

Un río pierde altura en su recorrido global, pero eso no exige que su ruta sea recta en un mapa. El agua se mueve por un cauce cuya forma afecta al flujo, mientras que el flujo mueve sedimentos y modifica el cauce. Una curva puede ser, por tanto, parte de una interacción cambiante y no un desvío impuesto a una corriente que, de otro modo, iría recta.

Esta explicación se aplica de forma más directa a ríos que discurren por sedimentos que pueden remodelar. Una curva impuesta por roca resistente está sometida a restricciones distintas. Antes de explicar por qué un río forma meandros, debemos preguntar de qué están hechas sus orillas y su lecho, y con qué libertad pueden cambiar.

El flujo en una curva es tridimensional. La cantidad de movimiento, la presión y la forma del cauce contribuyen al movimiento, por lo que la afirmación simple de que «el agua más rápida erosiona» es incompleta. La erosión en un lugar depende del balance entre el sedimento que llega y el que sale. Una gran capacidad de transporte no garantiza una retirada neta si el aporte también es grande. [2]

Los experimentos ayudan a comprobar qué ingredientes pueden mantener un cauce con meandros. En los experimentos con ríos de lecho grueso que se comentan aquí, la vegetación reforzó las orillas y el sedimento fino ayudó a rellenar posibles atajos. Se desarrollaron curvas y cortes de meandro repetidos en las condiciones experimentales; en ese montaje no fue necesario variar los máximos de crecida. El alcance importa: esto constituye evidencia sobre esos experimentos, no una receta universal para cualquier río. [1]

También importan el aporte de material aguas arriba y la forma cambiante de las barras sedimentarias. No se trata simplemente de una cinta transportadora que lleva cada grano desde una orilla exterior hasta la orilla interior adyacente. Distintas partes del cauce intercambian material a lo largo del tiempo, y algunos cambios modifican por dónde circula después el agua. [1,2]

Un meandro es, por tanto, resultado y causa del movimiento del agua. La tendencia del río a descender proporciona la dirección global, mientras que las interacciones locales determinan la ruta. Explicar una curva concreta requiere mediciones de ese río, no solo reconocer una forma curva familiar.

Notas técnicas (opcionales)

Una ruta más larga puede seguir descendiendo

Un cálculo breve elimina una aparente contradicción. Imaginemos dos puntos separados por 8 kilómetros medidos a lo largo de un valle, con un descenso de la superficie del agua de 6 metros entre ellos. Supongamos que la ruta sinuosa del río entre los mismos puntos mide 12 kilómetros. Son valores hipotéticos.

La sinuosidad del cauce, definida aquí como su longitud dividida por la longitud del valle, es $12/8 = 1,5$. Su descenso medio por unidad de longitud de cauce es $6/12\ 000 = 0,0005$, o 0,5 metros por kilómetro. Medido sobre la longitud del valle, el gradiente correspondiente es $6/8000 = 0,00075$, o 0,75 metros por kilómetro.

Ambos gradientes describen un descenso. Su diferencia surge porque son distintas las distancias por las que se divide el mismo cambio de elevación. Por tanto, una ruta sinuosa es compatible con un flujo impulsado por la gravedad.

El cálculo no establece que el río se curvara para alcanzar un gradiente preferido. Parte de una geometría y calcula una consecuencia. Invertir ese razonamiento para atribuirle un propósito sería un paso sin respaldo. Tampoco proporciona una velocidad local, que requeriría caudal, sección transversal, resistencia y otra información.

Referencias

- [1] C. A. Braudrick, W. E. Dietrich, G. T. Leverich and L. S. Sklar. Experimental evidence for the conditions necessary to sustain meandering in coarse-bedded rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(40), 16936–16941 (2009). <https://doi.org/10.1073/pnas.0909417106>
- [2] K. Whipple. Flow Around Bends: Meander Evolution. Lección III, Surface Processes and Landscape Evolution, MIT OpenCourseWare (septiembre de 2004). https://ocw.mit.edu/courses/12-163-surface-processes-and-landscape-evolution-fall-2004/3aa6d00113cc4b115d0c97630585e198_3_flow_around_bends.pdf

¿Puede un bosque seguir absorbiendo carbono indefinidamente?

Un bosque viejo puede almacenar una gran cantidad de carbono sin incorporar la misma cantidad adicional cada año. El almacenamiento es una reserva; la absorción neta es un flujo. Confundirlos lleva a dos errores opuestos: suponer que un bosque grande debe seguir añadiendo carbono a un ritmo constante para siempre, o suponer que un sumidero que se ralentiza vuelve irrelevante el carbono ya almacenado.

Un balance de carbono necesita fronteras. ¿Contamos solo los árboles vivos, o también las raíces, la madera muerta y el suelo? ¿Durante qué intervalo? El crecimiento, la descomposición, las perturbaciones y la recuperación pueden modificar distintos depósitos de maneras diferentes. Una afirmación sobre el bosque completo no puede establecerse midiendo solo un componente conveniente. [1]

Un análisis muy debatido de bosques maduros reunió estimaciones de la bibliografía y de bases de datos y comunicó una absorción neta de carbono. Cuestionó el supuesto simple de que los bosques viejos deban ser neutros en carbono. Ese resultado es una afirmación empírica sobre la evidencia reunida, no una demostración de que todos los bosques viejos se comporten igual. [2]

La interpretación ha sido objeto de debate. Una crítica sostuvo que la absorción estaba sobreestimada, y una respuesta cuestionó los argumentos generales para considerar poco fiables las estimaciones de flujo. Ambas forman parte de la explicación porque el desacuerdo concierne a cómo debe evaluarse la evidencia. El lector no debería recibir solo el resultado principal o solo su crítica. [3,4]

También existe una restricción básica a largo plazo. Un sistema finito no puede añadir carbono al mismo ritmo positivo indefinidamente y sin límite. Esa observación no proporciona una fecha de caducidad para el sumidero de un bosque real. Nos indica que debemos distinguir un intervalo medido de una extrapolación que se extiende mucho más allá; el balance ilustrativo de las notas explicita esa diferencia.

Las preguntas relevantes son cuánto carbono hay almacenado, si esa reserva está cambiando y qué procesos controlan el cambio. La edad por sí sola no responde completamente a ninguna de ellas. Proteger una reserva existente y comprender la absorción adicional implica magnitudes relacionadas, pero distintas.

Notas técnicas (opcionales)

Un balance numérico transparente

Consideremos una hectárea hipotética durante un año. Supongamos que la fotosíntesis fija 20 toneladas de carbono, la respiración vegetal devuelve 10 toneladas y la respiración microbiana y de otros heterótrofos devuelve 8 toneladas. Para este ejemplo, suponemos que no hay otras entradas, salidas ni perturbaciones, y que se incluyen todos los compartimentos pertinentes.

La ganancia neta es $20 - 10 - 8 = 2$ toneladas de carbono por hectárea y año. La fotosíntesis es diez veces esa ganancia neta. Presentar la entrada bruta como si fuera el sumidero exageraría, por tanto, el resultado por un factor de diez en este ejemplo inventado.

Ahora mantengamos la fotosíntesis en 20, pero aumentemos la respiración total de 18 a 20. La ganancia neta pasa a ser cero aunque la fotosíntesis continúe. Si otras 3 toneladas abandonan el inventario definido durante el año por una perturbación o una exportación, la reserva disminuye en 3 toneladas bajo estos supuestos.

El cálculo expresa conservación, no un conjunto de mediciones típicas de bosques. Enseña que una pequeña diferencia neta puede resultar de flujos opuestos mucho mayores. Estimar esa diferencia exige atender a las incertidumbres de ambos lados, en lugar de medir uno cuidadosamente e ignorar el otro.

Una reserva no puede crecer linealmente sin límite en un espacio finito

Si un ecosistema delimitado almacena carbono a una tasa neta positiva y constante r , tras un tiempo t su reserva habrá aumentado en rt . Extender esa regla indefinidamente hace que la masa almacenada aumente sin límite. Un área forestal finita con capacidad de almacenamiento finita no puede mantener esa extrapolación para siempre.

Este límite lógico no identifica el año en que se ralentizará la absorción de un bosque real. La capacidad de almacenamiento, los procesos del suelo, los cambios de vegetación y las condiciones ambientales hacen de ello una cuestión empírica. Tampoco impide la exportación desde un bosque a otro reservorio; exige contabilizar el carbono exportado en ese otro reservorio, con su propia persistencia y sus pérdidas.

Un modelo sencillo de reserva y pérdida precisa la distinción. Sea C una reserva de carbono, I una entrada constante y kC una pérdida proporcional a la reserva, con k positivo. Entonces $dC/dt = I - kC$. La reserva de equilibrio es I/k . La entrada continúa en el equilibrio, pero la acumulación neta es cero porque la pérdida compensa la entrada.

Se trata de una ilustración, no de un modelo forestal calibrado. Las entradas y tasas de pérdida reales cambian, los compartimentos tienen distintos tiempos de renovación y las perturbaciones no son un drenaje proporcional continuo. El modelo muestra por qué el flujo continuado y la acumulación neta ilimitada son afirmaciones distintas.

Referencias

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Capítulo 5: Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-5/>
- [2] S. Luyssaert et al. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213–215 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- [3] P. Gundersen, E. E. Thybring, T. Nord-Larsen, L. Vesterdal, K. J. Nadelhoffer and V. K. Johannsen. Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature* 591, E21–E23 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03266-z>
- [4] S. Luyssaert, E.-D. Schulze, A. Knohl, B. E. Law, P. Ciais and J. Grace. Reply to: Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature* 591, E24–E25 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03267-y>

¿Por qué la pérdida de una especie puede cambiar un ecosistema?

Retirar una especie elimina algo más que un nombre de una lista. Modifica interacciones: quién se come a quién, quién compite por el espacio y qué organismos pueden establecerse. El efecto depende en parte de esas relaciones, por lo que la abundancia por sí sola no es una medida fiable de la influencia ecológica.

El trabajo de Paine sobre depredación y competencia ofrece un caso concreto. El argumento era que un depredador puede impedir que un competidor fuerte monopolice un espacio limitado. Retirar al depredador puede, por tanto, reducir en vez de aumentar la variedad de organismos que ocupan ese espacio. [1]

En el conocido ejemplo de la estrella de mar *Pisaster*, su retirada fue seguida de un aumento de los mejillones y una disminución de la diversidad. El resultado es informativo porque el mecanismo propuesto vincula una interacción manipulada con cambios en la comunidad. Es más que observar que dos especies coinciden en un lugar. [2]

El resultado sorprendente deja de serlo tanto al separar los efectos directos de los indirectos. Un depredador perjudica directamente a sus presas, pero al limitarlas puede dejar oportunidades para otros organismos. La respuesta de la comunidad incluye esas consecuencias indirectas. No siempre puede predecirse sumando beneficios y perjuicios aislados entre pares.

Esto no establece que toda retirada provoque un colapso. Tampoco muestra que otra especie vaya a compensarla siempre. Una afirmación sobre una comunidad concreta necesita evidencia sobre sus interacciones, condiciones y respuesta a lo largo del tiempo. La ilustración numérica de las notas es un modelo de propagación posible, no un pronóstico para un ecosistema.

El caso cambia nuestra manera de preguntar. En vez de preguntar si una especie es simplemente «importante», preguntamos qué hace en una red y qué cambia cuando se altera esa función. Los efectos ecológicos pueden estudiarse sin convertir su magnitud en una medida del valor moral de una especie.

Notas técnicas (opcionales)

Los efectos inmediatos y los finales son distintos

Una pequeña ilustración matemática separa dos preguntas que a menudo se mezclan en explicaciones informales. Sea N una población de presas y P una población de depredadores. Supongamos que el modelo expresa la variación de las presas como $dN/dt = rN(1 - N/K) - aPN$. Aquí r es un parámetro positivo de crecimiento, K un parámetro de capacidad de carga y a un coeficiente positivo de interacción. Es un modelo ilustrativo, no una descripción ajustada de la comunidad de Paine.

Con el mismo N , fijar P en cero elimina el término de pérdida aPN . La tasa inmediata de aumento de las presas en el modelo crece en esa cantidad. Esa deducción no especifica la abundancia final de presas en una comunidad real, porque no dice nada sobre los cambios posteriores en los recursos, otros consumidores o las condiciones ambientales.

La distinción es aún mayor para la riqueza de especies, que esta ecuación con una sola presa no representa en absoluto. Una afirmación algebraica correcta sobre la tasa inmediata de crecimiento no puede citarse como cálculo de cuántas otras especies desaparecerán. Para responder a esa pregunta más amplia, el modelo necesitaría organismos adicionales e interacciones justificadas.

Referencias

- [1] R. T. Paine. Food Web Complexity and Species Diversity. The American Naturalist 100(910), 65-75 (1966). <https://doi.org/10.1086/282400>
- [2] OpenStax. Biology 2e, apartado 45.6: Community Ecology.
<https://openstax.org/books/biology-2e/pages/45-6-community-ecology>

¿Por qué puede apagarse una llama aunque quede combustible?

Una llama puede apagarse aunque quede combustible. El combustible es un recurso potencial; una llama que persiste requiere además que las reacciones y el transporte se mantengan mutuamente. Si el calor se pierde demasiado deprisa, o el material reactivo no permanece en condiciones adecuadas el tiempo suficiente, la presencia de material sin quemar no basta.

La temperatura importa porque las velocidades de reacción dependen de ella. El enfriamiento puede ralentizar los procesos que liberan calor, lo que puede causar un enfriamiento adicional. Las notas presentan una relación sencilla de velocidad de reacción y un balance térmico, con sus limitaciones. Son modelos de la realimentación, no umbrales numéricos universales para incendios reales. [2]

Un estudio numérico de llamas sobre combustible sólido examinó una extinción en la que intervenía la conducción. Su importancia aquí reside en el mecanismo que investiga: la transferencia de calor puede impedir que una llama se mantenga. El estudio debe describirse como modelización, no como un experimento que midió directamente todos los procesos representados en el cálculo. [1]

Otra distinción concierne al tiempo. Una llama puede extinguirse por pérdida de calor, mientras que los cambios de flujo también pueden dejar un tiempo de residencia demasiado breve para que las reacciones la mantengan. Estas posibilidades no deben reducirse a la afirmación de que toda llama se apaga únicamente porque se ha agotado el oxígeno. [1]

Los programas experimentales pueden separar algunas de las influencias concurrentes. La descripción de la NASA de la investigación SoFIE-MIST presenta estudios sobre flujo, concentración de oxígeno, presión y radiación en microgravedad. Esos objetivos declarados no deben presentarse como resultados ya obtenidos. [3]

La respuesta implica procesos acoplados: el combustible, la reacción, el calor y el movimiento de material deben seguir siendo compatibles. Por eso un único valor de temperatura o de oxígeno no puede explicar todas las extinciones. Este capítulo explica la ciencia de la persistencia y la extinción; no es una guía para realizar experimentos con fuego.

Notas técnicas (opcionales)

Hay que considerar conjuntamente la reacción y la pérdida de calor

Un balance energético compacto aclara el problema. Sea U la energía térmica de una región de reacción elegida. Escribimos $dU/dt = P_{\text{release}} - P_{\text{out}}$, donde P_{release} es la tasa de liberación de energía química y P_{out} la tasa neta a la que sale energía mediante todas las demás transferencias incluidas. Ambos términos tienen unidades de potencia.

Esta expresión deliberadamente condensada exige cuidado. En un sistema con flujo, el transporte de energía por la materia que entra y sale debe incluirse en el balance, junto con la conducción y la radiación. Aquí P_{out} se define para reunir esas contribuciones netas; no afirma que la llama sea un objeto cerrado que pierde calor únicamente por su superficie.

Si P_{out} supera P_{release} , U disminuye. En condiciones adecuadas, ese enfriamiento reduce la velocidad de reacción y hace disminuir aún más P_{release} . Entonces puede dejar de existir un estado autosostenido. La afirmación importante es condicional: un desequilibrio breve no tiene por qué extinguir cualquier llama, y un balance energético por sí solo no calcula el límite completo de extinción.

Por qué un enfriamiento moderado puede importar mucho

La cinética química explica por qué la cantidad de reactivo no basta. La expresión de Arrhenius $k = A \exp(-E_a/RT)$ describe la dependencia con la temperatura de muchos coeficientes de velocidad de reacción en regímenes especificados. Aquí A es un factor preexponencial, E_a una energía de activación, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta. OpenStax desarrolla esta relación al tratar la teoría de colisiones. [2]

Para una ilustración transparente, supongamos $E_a/R = 10\,000$ kelvin y tratemos A como constante. Son supuestos hipotéticos del modelo, no parámetros de un combustible concreto. Comparar 900 K con 1 000 K da $k(900)/k(1000) = \exp[-10\,000(1/900 - 1/1000)] = \exp(-1,111\dots)$, aproximadamente 0,329.

La temperatura ha caído un 10 %, pero este coeficiente del modelo ha disminuido hasta aproximadamente un tercio. El cálculo se refiere a un coeficiente, no a la velocidad total de una llama real. Las concentraciones, el transporte y las múltiples vías químicas se han dejado fuera del ejemplo. Demuestra por qué el enfriamiento puede afectar mucho a la reposición química de energía; no proporciona una temperatura de extinción.

Una reacción que libera energía en conjunto puede aun así avanzar demasiado despacio para sostener una llama. El signo del cambio energético total y la velocidad de la reacción responden a preguntas distintas. La capacidad de un combustible para liberar energía no implica que la libere con suficiente rapidez en cualquier condición.

Referencias

- [1] C. Li, J. T'ien and M. Johnston. Extinction of the Stagnation Point Diffusion Flame: Effect of Conductive Heat Loss into Solid Interior. Trabajo presentado en el 13th US National Meeting of the Combustion Institute, College Station, TX (2023). NASA Technical Reports Server 20230000860. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230000860>
- [2] OpenStax. Chemistry 2e, apartado 12.5: Collision Theory. <https://openstax.org/books/chemistry-2e/pages/12-5-collision-theory>
- [3] NASA. Solid Fuel Ignition and Extinction: Material Ignition and Suppression Test (SoFIE-MIST). <https://science.nasa.gov/biological-physical/investigations/sofie-mist/>

¿Por qué muchas hojas son verdes?

Una hoja verde no devuelve toda la luz verde. Su aspecto refleja una comparación entre las longitudes de onda que llegan a nuestros ojos. Parte de la luz verde puede absorberse aunque el verde se refleje más intensamente que otros colores visibles. «Más reflejado» no significa lo mismo que «nada absorbido».

La clorofila absorbe relativamente poco en la región verde, mientras que otros pigmentos también contribuyen al comportamiento óptico del material fotosintético. Pero las mediciones de pigmento extraído y las de una hoja completa no describen objetos idénticos. Dentro de una hoja, la estructura modifica por dónde viaja la luz y dónde puede absorberse. [1,2]

Esa distinción importa para la fotosíntesis. La luz absorbida cerca de la superficie y la que llega a tejidos más profundos no tienen por qué producir el mismo efecto bajo una determinada iluminación de fondo. Una hoja no es una capa fina y uniforme de pigmento, y su respuesta no puede deducirse directamente del color de una disolución de pigmento. [2]

En experimentos con hojas de girasol, añadir luz verde pudo impulsar la fotosíntesis con más eficacia que añadir luz roja bajo iluminación blanca moderada o intensa. La interpretación implicaba la distribución de la luz dentro de la hoja. Es un resultado condicional, no evidencia de que el verde sea siempre la mejor luz para cualquier planta en cualquier entorno. [2]

Las mediciones que van más allá del color visible aportan información. La reflectancia en las regiones visible e infrarroja cercana puede responder a los pigmentos y a la estructura de la hoja, lo que resulta útil en teledetección. Un aspecto más verde no es, por tanto, una medida directa de una tasa fotosintética mayor. Distintas observaciones responden a distintas preguntas. [3]

La explicación inmediata concierne a la absorción, la reflexión y el uso de la luz en una hoja estructurada. No establece por sí sola una historia evolutiva completa de por qué los pigmentos actuales tienen sus propiedades particulares. Separar esas preguntas permite explicar el color familiar sin convertir una historia plausible en evidencia establecida.

Notas técnicas (opcionales)

Una reflexión relativa mayor no es un rechazo total

Una ilustración numérica puede poner de manifiesto el error habitual. Imaginemos que llegan cantidades iguales de fotones de una longitud de onda verde y de una roja. De 100 fotones verdes, supongamos que se reflejan 15, se transmiten 10 y se absorben 75. De 100 fotones rojos, supongamos que se reflejan 5, se transmiten 5 y se absorben 90. Son balances ópticos inventados, no valores medidos en una especie concreta.

El número de fotones verdes reflejados triplica el de rojos reflejados, aunque se absorban tres cuartas partes de los fotones verdes incidentes. Un exceso relativo en la luz saliente es plenamente compatible con una absorción considerable de ese mismo color.

Para cada longitud de onda, estos balances simplificados satisfacen $R + T + A = 1$, donde R, T y A son las fracciones reflejada, transmitida y absorbida. El cálculo omite la

conversión en luz emitida a otra longitud de onda y utiliza un haz incidente claramente definido. Es una contabilidad, no un modelo completo de la percepción humana del color.

El ejemplo no establece que la hoja vaya a tener un tono percibido exacto. También importan otras longitudes de onda y la respuesta visual del observador. Establece la conclusión lógica más limitada: un objeto que parece verde no tiene por qué rechazar toda la luz verde que recibe, ni siquiera la mayor parte.

Referencias

- [1] OpenStax. Biology 2e, apartado 8.2: The Light-Dependent Reactions of Photosynthesis. <https://openstax.org/books/biology-2e/pages/8-2-the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis>
- [2] I. Terashima, T. Fujita, T. Inoue, W. S. Chow and R. Oguchi. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant and Cell Physiology* 50(4), 684–697 (2009). <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>
- [3] NASA Earth Observatory. Seeing Leaves in a New Light. <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/seeing-leaves-in-a-new-light/>

¿De dónde obtiene un árbol la mayor parte de su masa seca?

Parece que un árbol en crecimiento extrae su sustancia del suelo. Las raíces penetran en él y el tronco que tienen encima gana peso. Sin embargo, el suelo no es el principal material que pasa a formar la madera. En un árbol fotosintético, el carbono incorporado a la nueva materia orgánica procede principalmente del dióxido de carbono atmosférico. [1,2]

Esa respuesta exige cuidado porque la madera seca no es carbono puro. El oxígeno y el hidrógeno también contribuyen de forma considerable, junto con otros elementos. En una composición ilustrativa del manual citado, el carbono y el oxígeno representan cada uno alrededor del cuarenta y cinco por ciento del material seco, y el hidrógeno, alrededor del seis por ciento. Son promedios didácticos, no un análisis de todos los árboles. [1]

El dióxido de carbono entra en las hojas por las aberturas estomáticas. La fijación del carbono incorpora su carbono a moléculas orgánicas, que contribuyen a construir otros compuestos vegetales. La luz solar aporta energía para estas transformaciones; no aporta los átomos de carbono. La materia y la energía cumplen funciones diferentes. [2]

Los árboles también respiran. Parte del carbono fijado por fotosíntesis regresa a la atmósfera, por lo que la fijación bruta no equivale al incremento retenido en un árbol. Una medida de crecimiento necesita un balance que cuente ganancias y pérdidas dentro de la frontera elegida. Las notas ilustran esa contabilidad sin suponer que la madera consiste en un único azúcar sencillo. [2]

Los nutrientes minerales siguen siendo esenciales aunque no aporten la mayor parte de la masa. La escasez de un elemento necesario puede limitar el crecimiento. Los experimentos con disoluciones nutritivas permiten variar el aporte mineral y estudiar esas deficiencias sin tratar la masa del suelo como el alimento principal de la planta. La importancia no se mide solo por la masa. [1]

«Hecho de aire» es, por tanto, una corrección útil solo si no se convierte en un nuevo eslogan. El agua, los nutrientes disueltos y el dióxido de carbono atmosférico importan. El árbol construye material orgánico a partir de entradas materiales y utilizando energía; no crea materia a partir de la luz ni traslada sobre el suelo una cantidad de tierra con forma de tronco.

Notas técnicas (opcionales)

Un cálculo que no pretende que la madera sea azúcar

Consideremos 10 kilogramos hipotéticos de materia seca recién retenida que contiene un 45 por ciento de carbono. El carbono retenido es de 4,5 kilogramos. Con masas atómicas redondeadas de 12 para el carbono y 16 para el oxígeno, el dióxido de carbono tiene una masa molecular de 44 y una fracción másica de carbono de 12/44.

Aportar 4,5 kilogramos de carbono requiere, por tanto, el carbono de $4,5 \times 44/12 = 16,5$ kilogramos de dióxido de carbono. Es una cantidad equivalente para el carbono retenido, no una absorción bruta medida en un árbol real. La respiración y el carbono exportado podrían requerir fijación adicional. Tampoco los 16,5 kilogramos permanecen

íntegramente en los 10 kilogramos de materia seca: los balances de oxígeno e hidrógeno implican otras entradas, productos e intercambios.

El cálculo hace visible la escala. Un gas puede aportar una masa considerable aunque no podamos verlo entrar en las hojas. También muestra por qué «45 por ciento de carbono» no puede sustituirse por «45 por ciento de dióxido de carbono». El dióxido de carbono incluye el oxígeno que acompaña a ese carbono; confundir ambos modifica la respuesta por un factor de 44/12.

Por qué una ecuación ajustada no es una película átomo a átomo

El balance fotosintético simplificado que suele escribirse con dióxido de carbono, agua, carbohidrato y oxígeno es útil para comprobar los números de átomos. Por sí solo no identifica qué átomo de oxígeno concreto termina en qué producto tras las reacciones y los intercambios reales. Un balance neto cancela los intermediarios. Omite deliberadamente parte de la historia molecular.

La celulosa ofrece otra distinción útil. Su unidad repetitiva idealizada es $C_6H_{10}O_5$. Con las mismas masas atómicas redondeadas, el carbono aporta 72 de las 162 unidades de masa de esa unidad, aproximadamente un 44,4 por ciento. Es un cálculo químico para la celulosa, no una afirmación de que todos los tejidos de un árbol tengan esa composición. La madera es una mezcla, y los residuos minerales, las proteínas y otros componentes modifican sus proporciones elementales.

Así, una expresión como «principalmente carbono» puede ser engañosa si significa que el carbono por sí solo supera la mitad de la masa. Lo que se construye en gran medida a partir de carbono fijado es un conjunto de moléculas que contienen carbono. Esas moléculas contienen una masa considerable de otros elementos. La distinción es pequeña en la redacción y grande en su significado científico.

Referencias

[1] OpenStax. Biology 2e, apartado 31.1: Nutritional Requirements of Plants.

<https://openstax.org/books/biology-2e/pages/31-1-nutritional-requirements-of-plants>

[2] OpenStax. Biology 2e, apartado 8.3: Using Light Energy to Make Organic Molecules.

<https://openstax.org/books/biology-2e/pages/8-3-using-light-energy-to-make-organic-molecules>

¿Cómo puede una semilla seguir viva sin crecer?

Una semilla que no crece puede conservar la capacidad de crecer. La distinción es entre actividad presente y función recuperable. Pero ni siquiera esa distinción basta: una semilla viva puede estar en dormancia o simplemente no poder germinar porque falta un requisito externo, como el agua. [1]

La dormancia tiene un significado más preciso que la inactividad. Una semilla en dormancia no germina en condiciones que permitirían hacerlo a una semilla comparable sin dormancia. Una semilla muerta no puede recuperarse solo porque esas condiciones mejoren. A primera vista, estas situaciones pueden parecer similares; por eso importan las comprobaciones de su respuesta. [1]

En las semillas tolerantes a la desecación, la pérdida de agua durante la maduración reduce la movilidad molecular y la actividad metabólica. Los procesos protectores ayudan a conservar los componentes celulares. El embrión no es solo un conjunto de instrucciones: contiene estructuras físicas y recursos cuyo estado importa cuando se reanuda la actividad. No debe suponerse que estos mecanismos se apliquen de manera idéntica a todas las semillas. [1,2]

El almacenamiento no suspende todos los cambios. Pueden acumularse daños, y la reparación durante la recuperación puede afectar al éxito de la germinación. Una semilla puede tardar más en germinar o producir una plántula menos vigorosa antes de perder por completo la capacidad de germinar. Medir solo si acaba brotando deja fuera parte de esa historia. [2]

En *Arabidopsis*, la posmaduración y los tratamientos de temperatura adecuados pueden aliviar la dormancia, con controles hormonales y genéticos que contribuyen a la transición. Se trata de respuestas que interactúan, no de un único interruptor universal. Los experimentos deben distinguir un cambio en la dormancia de un cambio en la capacidad para completar la germinación. [1]

Una semilla puede seguir viva sin crecer porque el crecimiento es una de las actividades de un sistema vivo, no la definición de cada momento de su existencia. Su futuro depende de lo que se haya conservado, de lo que se haya dañado y de las condiciones que permitan recuperarse. Esperar puede ser una estrategia eficaz sin equivaler a una conservación indefinida.

Referencias

[1] N. Sajeev, M. Koornneef and L. Bentsink. A commitment for life: Decades of unraveling the molecular mechanisms behind seed dormancy and germination. *The Plant Cell* 36, 1358–1376 (2024). <https://doi.org/10.1093/plcell/koad328>

[2] W. Waterworth, A. Balobaid and C. West. Seed longevity and genome damage. *Bioscience Reports* 44, BSR20230809 (2024). <https://doi.org/10.1042/BSR20230809>

¿Por qué puede persistir la resistencia tras dejar de usar un antibiótico?

Dejar de utilizar un antibiótico elimina una presión selectiva. No borra los cambios heredados que hicieron resistente a una población. Que la resistencia disminuya después depende de cómo les vaya a las variantes resistentes y sensibles en las condiciones que permanecen. Esta es una pregunta sobre poblaciones, no una orientación para iniciar o suspender un tratamiento. [1]

Si la resistencia tiene un coste reproductivo, los competidores sensibles pueden adquirir una ventaja cuando el fármaco está ausente. Pero ese coste no es fijo para todos los mecanismos, contextos genéticos y ambientes. Algunas resistencias tienen poco coste en las condiciones consideradas, de modo que retirar el fármaco no tiene por qué crear una fuerza intensa contra ellas. [1]

Una segunda posibilidad es la compensación. Un cambio genético adicional puede mejorar el desempeño de un organismo resistente sin eliminar su resistencia. Eso difiere de la reversión, que elimina o revierte el mecanismo de resistencia. La evolución no ha deshecho necesariamente un cambio solo porque haya reducido la desventaja asociada a él. [2]

Para distinguir esas posibilidades, los investigadores pueden comparar combinaciones reconstruidas de cambios de resistencia y compensación tanto en presencia como en ausencia del fármaco. Observar únicamente la cepa final no permite saber qué aportó cada cambio. La comparación debe separar los componentes del mecanismo propuesto. [2]

La resistencia también puede ir ligada a otros rasgos favorecidos. La selección del conjunto ligado puede mantener un determinante de resistencia incluso cuando su propio antibiótico está ausente. Esta coselección significa que el ambiente relevante incluye más de un fármaco y más de una posible ventaja. [1]

Las notas muestran cómo incluso un pequeño coste residual modifica un calendario simplificado de disminución. Las poblaciones reales añaden más complicaciones, por lo que el cálculo no predice una reversión clínica. La resistencia puede persistir porque su coste es pequeño, está compensado o queda superado por otros procesos. La retirada cambia las condiciones; no es un botón de reinicio. [1,2]

Notas técnicas (opcionales)

Cómo un pequeño coste residual cambia los plazos

Un modelo deliberadamente sencillo hace visible la consecuencia. Sea p la fracción resistente; sea 1 la producción reproductiva de las variantes sensibles y $1 - c$ la de las resistentes por generación. Suponemos una población grande y cerrada, condiciones constantes, ninguna mutación nueva, ninguna transferencia y ninguna otra diferencia. La siguiente fracción resistente es $p_{\text{next}} = p(1 - c)/(1 - cp)$.

Escribir la razón entre resistentes y sensibles como $O = p/(1 - p)$ facilita seguir la misma relación: tras n generaciones, $O_n = O_0(1 - c)^n$. Es una deducción del modelo declarado, no una predicción para un paciente o una comunidad.

Partimos de $p = 0,90$, de modo que la razón es 9. Con un coste supuesto $c = 0,02$, tras 100 generaciones la razón es aproximadamente $9 \times 0,98^{100} = 1,19$, que corresponde a una fracción resistente de alrededor de 0,544. Con un coste reducido a 0,002, la fracción correspondiente es aproximadamente 0,880. Reducir diez veces el coste hace mucho más lenta la desaparición en este modelo, aunque ambos costes sean positivos.

Ningún resultado indica cuántos días de calendario intervienen. Las generaciones de un modelo homogéneo no son intercambiables con el tiempo de una infección estructurada o de un reservorio ambiental. El valor del modelo consiste en identificar qué parámetro controla la predicción condicional y por qué puede inducir a error suponer un coste considerable sin medirlo.

Referencias

- [1] D. I. Andersson and D. Hughes. Antibiotic resistance and its cost: is it possible to reverse resistance? *Nature Reviews Microbiology* 8, 260-271 (2010). <https://doi.org/10.1038/nrmicro2319>
- [2] P. Schulz zur Wiesch, J. Engelstädter and S. Bonhoeffer. Compensation of Fitness Costs and Reversibility of Antibiotic Resistance Mutations. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* 54, 2085-2095 (2010). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2863634/>

¿Por qué persiste la reproducción sexual?

La reproducción sexual mezcla material heredado, pero nombrar ese efecto no explica por qué persiste. La mezcla puede tener beneficios y costes, y su balance depende de la población y de sus circunstancias. Una explicación del mantenimiento tampoco tiene por qué explicar el primer origen del sexo. [1]

La comparación importa. Los sistemas reproductivos difieren en más aspectos que la contribución de dos progenitores. La conducta de apareamiento, el tamaño de la población y una selección cambiante afectan a lo que se compara. Una afirmación amplia como «la variación es útil» deja fuera cuándo ayuda la variación y si sus beneficios superan sus costes. [1]

Una forma de poner a prueba un beneficio propuesto consiste en hacer que el ambiente cambie mediante un adversario que evoluciona. Morran y sus colaboradores estudiaron poblaciones de nematodos sin patógeno, con una cepa fija de patógeno o con un patógeno bacteriano en coevolución. Los tratamientos permitieron distinguir la presencia de un patógeno de las consecuencias de su evolución continua. [2]

En ese sistema, la coevolución mantuvo más cruzamiento entre individuos en las poblaciones capaces de variar su conducta de apareamiento. Las poblaciones obligadamente autofecundantes se extinguieron en el tratamiento de coevolución, mientras que las poblaciones con cruzamiento persistieron. El resultado respalda una ventaja de la mezcla genética en las condiciones de hospedador y patógeno estudiadas. No establece que los parásitos expliquen todos los casos de reproducción sexual. [2]

Otras explicaciones conciernen a las mutaciones perjudiciales o a la combinación de cambios ventajosos. Estos mecanismos no tienen por qué excluirse entre sí, y su importancia puede depender de las asociaciones entre genes y de la historia de la selección. Los experimentos que los distinguen resultan más informativos que una lista de posibles beneficios. [1]

La pregunta tiene, por tanto, una respuesta condicional. La reproducción sexual puede persistir cuando las consecuencias de la mezcla mejoran el éxito lo suficiente como para compensar sus costes. El trabajo científico difícil consiste en identificar esas consecuencias en un entorno concreto y ponerlas a prueba, en vez de suponer que una explicación atractiva debe encajar con todos los seres vivos.

Referencias

- [1] S. P. Otto. The evolutionary enigma of sex. *The American Naturalist* 174, suplemento 1, S1-S14 (2009). <https://doi.org/10.1086/599084>
- [2] L. T. Morran, O. G. Schmidt, I. A. Gelarden, R. C. Parrish II and C. M. Lively. Running with the Red Queen: Host-parasite coevolution selects for biparental sex. *Science* 333, 216-218 (2011). <https://doi.org/10.1126/science.1206360>

¿Por qué son diferentes los hermanos?

Los hermanos comparten progenitores, pero normalmente no heredan la misma combinación de material genético. Durante la meiosis, los cromosomas emparejados se separan en gametos. El entrecruzamiento intercambia material entre cromosomas correspondientes, de modo que un cromosoma transmitido a un hijo puede contener un mosaico de segmentos de las dos copias de uno de sus progenitores. [1,2]

Ese mecanismo explica por qué una familia puede generar combinaciones heredadas diferentes. No significa que contar combinaciones prediga las características de un hijo. Muchas diferencias de secuencia tienen poco efecto sobre una medida concreta, mientras que muchos rasgos dependen de varias influencias. Un recuento de posibilidades no es un catálogo de vidas predeterminadas.

Las notas utilizan un pequeño modelo de herencia para hacer visible el razonamiento combinatorio. Sus supuestos simplifican lo que hacen los cromosomas reales. El entrecruzamiento añade variación, pero aumentar el número de posibilidades sigue sin identificar la causa de una diferencia particular en estatura, respuesta inmunitaria o conducta. [1]

El desarrollo también tiene una historia. Compartir un hogar no equivale a experimentar condiciones idénticas en todas las etapas. Para preguntar por qué difieren los hermanos, debemos especificar la característica y las influencias relevantes, en lugar de colocar todas las diferencias en la misma categoría.

Los gemelos monocigóticos ayudan a precisar la distinción. Se originan a partir del mismo óvulo fecundado y tienen casi la misma composición genética inicial. El matiz importa: la comparación es informativa precisamente porque una gran semejanza genética no garantiza organismos idénticos ni resultados de desarrollo idénticos. [3]

Los hermanos pueden diferir por sus combinaciones heredadas y por el curso del desarrollo. Explicar una diferencia específica requiere evidencia sobre ese rasgo y esos individuos. La expresión «mismos progenitores» identifica una relación; no establece un material inicial idéntico, una experiencia idéntica ni un futuro idéntico.

Notas técnicas (opcionales)

Un pequeño modelo de herencia

Tomemos una posición autosómica y supongamos que las dos copias de la madre pueden distinguirse como M1 y M2, y las del padre como F1 y F2. Suponemos que cada una se transmite con probabilidad de un medio y que las transmisiones a los dos hijos son independientes. Los hermanos tienen una probabilidad de un medio de coincidir en la copia heredada de la madre y de un medio de coincidir en la heredada del padre.

Bajo estos supuestos, comparten ambas copias por descendencia con probabilidad de un cuarto, una copia con probabilidad de un medio y ninguna con probabilidad de un cuarto. El número esperado de copias compartidas es $2 \times 1/4 + 1 \times 1/2 + 0 \times 1/4 = 1$ de 2. De ahí procede el valor esperado local de un medio.

Una sucesión de posiciones a lo largo de un cromosoma no es un conjunto de lanzamientos independientes de una moneda. El ligamiento y la recombinación hacen que los sucesos hereditarios cercanos estén correlacionados. Por tanto, el modelo de una posición no puede multiplicarse sobre cada letra del ADN para calcular la semejanza

genómica completa de una pareja real. Su finalidad es aclarar el valor esperado y sus supuestos.

El conocido recuento es solo un punto de partida

Si omitimos el entrecruzamiento, 23 pares de cromosomas que se distribuyen independientemente darían $2^{23} = 8\,388\,608$ combinaciones en un modelo simplificado de gameto. Combinar un gameto de cada progenitor da $2^{46} = 70\,368\,744\,177\,664$ emparejamientos posibles en ese mismo modelo simplificado. Son recuentos combinatorios, no números medidos de embriones viables o personalidades distintas.

El entrecruzamiento añade variación más allá de las combinaciones de cromosomas intactos. [1] Pero multiplicar posibilidades no explica ningún rasgo concreto. Muchas diferencias de secuencia tienen poco efecto sobre una medición especificada, y muchos rasgos dependen de combinaciones de influencias. Un gran número de combinaciones genéticas no puede interpretarse como el mismo número de resultados vitales predeterminados.

El cálculo es útil precisamente cuando sus límites permanecen explícitos. Muestra por qué repetir una concepción no tiene por qué repetir un genotipo. No asigna probabilidades a todas las apariencias, capacidades o experiencias posibles.

Referencias

- [1] OpenStax. Biology 2e, apartado 11.1: The Process of Meiosis.
<https://openstax.org/books/biology-2e/pages/11-1-the-process-of-meiosis>
- [2] National Human Genome Research Institute. Homologous Recombination.
<https://www.genome.gov/genetics-glossary/homologous-recombination>
- [3] National Human Genome Research Institute. Cloning Fact Sheet.
<https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Cloning-Fact-Sheet>

¿Cómo pueden realizar distintas funciones células con el mismo ADN?

Dos células pueden poseer, en términos generales, el mismo genoma y utilizarlo de forma distinta. La presencia de un gen no nos dice cuánto de su producto se está fabricando, adónde va ese producto o cuánto tiempo permanece activo. El funcionamiento de la célula depende de esos procesos continuos además de las secuencias disponibles. [1]

La regulación ocurre en varias etapas. La transcripción, el procesamiento del ARN, la traducción y la modificación o retirada de proteínas pueden afectar al resultado. Una diferencia entre células no tiene por qué proceder de encender por completo un gen y apagar por completo otro. También importan las cantidades, los tiempos y las interacciones. [1]

Las mediciones de ARN en células individuales hacen observables algunas de estas diferencias. El estudio Tabula Sapiens reunió un atlas de referencia de casi medio millón de células de veinticuatro tejidos y órganos humanos y caracterizó más de cuatrocientos tipos celulares. Midió la variación en vez de tratar un órgano como una célula genérica. [2]

Sin embargo, un atlas no identifica automáticamente las causas. Un patrón de expresión medido puede contribuir a la conducta de una célula, resultar de ella o participar en una realimentación. Se necesitan intervenciones para poner a prueba esas alternativas. Las notas técnicas ofrecen un modelo mínimo de cómo la realimentación puede mantener estados diferentes sin modificar las reglas subyacentes.

La cromatina, el empaquetamiento del ADN con proteínas, forma parte de este panorama regulador. Llamar «epigenética» a una diferencia no especifica el cambio relevante ni demuestra que cause la función observada. Una explicación útil identifica qué cambió, cómo afecta a la actividad y si el efecto persiste a través de la división. [1]

La expresión «mismo ADN» también tiene excepciones, entre ellas las mutaciones y los cambios especializados de algunas células. La explicación central no depende de negarlas. Células con, en términos generales, el mismo genoma pueden mantener funciones distintas porque poseer información y utilizarla de forma regulada son cosas diferentes.

Notas técnicas (opcionales)

Un modelo mínimo de memoria celular

Supongamos, como modelo explícitamente hipotético, que una proteína reguladora promueve su propia producción. Sea x su concentración, y escribamos la tasa de cambio como producción basal más producción dependiente de la retroalimentación menos eliminación: $dx/dt = b + a x^2/(K^2 + x^2) - d x$. Aquí b , a , K y d son parámetros positivos que describen las tasas propuestas y la escala de respuesta.

Para algunas elecciones de parámetros, la ecuación puede admitir más de un estado estacionario estable. Una entrada transitoria puede entonces llevar el sistema a un estado que persiste después de que desaparezca la entrada. Para otras elecciones, solo existe un estado estable. La ecuación no demuestra que un tipo celular concreto utilice

este circuito exacto; muestra qué requeriría un mecanismo de persistencia que pudiera ponerse a prueba.

La distinción importa porque una señal iniciadora breve y un proceso de mantenimiento continuado no son la misma causa. Si retirar una señal después de la diferenciación deja intacto el estado, la señal no era necesariamente irrelevante. Puede haber activado un sistema que ahora se mantiene mediante interacciones distintas.

Referencias

[1] OpenStax. Biology 2e, apartado 16.1: Regulation of Gene Expression.

<https://openstax.org/books/biology-2e/pages/16-1-regulation-of-gene-expression>

[2] The Tabula Sapiens Consortium. The Tabula Sapiens: A multiple-organ, single-cell transcriptomic atlas of humans. Science 376, eabl4896 (2022). <https://doi.org/10.1126/science.abl4896>

¿Cómo adquiere su forma un organismo en desarrollo?

Un embrión no consulta un dibujo en miniatura del organismo terminado. Su forma en desarrollo surge mediante la actividad regulada y las interacciones físicas entre células. Para explicarla, necesitamos conectar las señales con las fuerzas y los movimientos, no limitarnos a nombrar los genes implicados.

La identidad celular y la forma de un tejido son resultados distintos. Saber qué moléculas expresa una célula no muestra por sí solo cómo se doblará una lámina de células. La geometría, las conexiones y la respuesta mecánica del tejido vecino afectan a lo que puede lograr un cambio local.

Un mecanismo estudiado es la constricción apical, en la que las células estrechan su superficie superior expuesta. En embriones tempranos de *Drosophila*, los investigadores utilizaron la activación de la señalización de Rho controlada por luz para imponer actividad contráctil local e investigar los cambios de forma resultantes. La intervención conecta una señal especificada con una respuesta física en condiciones controladas. [1]

Eso resulta más informativo que observar que una señal y un pliegue aparecen juntos. Aun así, una respuesta impuesta experimentalmente tiene un alcance: su interpretación depende del tejido y de la geometría estudiados. No debe convertirse en la afirmación de que una sola acción local explica todos los pliegues de todos los organismos en desarrollo.

La realimentación también puede ir del movimiento hacia una señalización adicional. Un estudio del endodermo de *Drosophila* distinguió el inicio transcripcional de la propagación, en la que intervenían la deformación y la realimentación mecánica. La onda de activación de Rho1-miosina II que avanzaba no requería una transcripción sostenida del mismo modo que su inicio. Iniciar un proceso y mantenerlo en marcha puede depender de mecanismos diferentes. [2]

Estos casos explican conexiones particulares en el desarrollo de la forma, no una teoría predictiva completa del desarrollo. Una forma reproducible puede surgir porque la regulación heredada y las interacciones físicas restringen repetidamente lo que sucede después. El organismo no necesita ver una meta para que su desarrollo esté organizado. [1,2]

Referencias

- [1] E. Izquierdo, T. Quinkler and S. De Renzis. Guided morphogenesis through optogenetic activation of Rho signalling during early *Drosophila* embryogenesis. *Nature Communications* 9, 2366 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04754-z>
- [2] A. Bailles et al. Genetic induction and mechanochemical propagation of a morphogenetic wave. *Nature* 572, 467-473 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1492-9>

¿Por qué los seres vivos envejecen a ritmos distintos?

Los seres vivos no se limitan a vivir distinto número de años. Sus probabilidades de morir pueden cambiar con la edad de maneras diferentes. La duración de la vida, el riesgo asociado a la edad y los cambios de función son mediciones relacionadas, pero no descripciones intercambiables del envejecimiento.

Una tasa de mortalidad está condicionada a haber sobrevivido hasta la edad considerada. No es simplemente la fracción de un grupo original que ha muerto para entonces. La distinción ayuda a separar las muertes acumuladas del riesgo que afrontan los individuos restantes. Las notas ilustran esa diferencia con un ejemplo sencillo.

Un estudio comparativo de animales y plantas encontró patrones de mortalidad y reproducción que aumentaban, permanecían aproximadamente constantes, disminuían o seguían formas más complejas con la edad. El conocido aumento de la mortalidad adulta no es, por tanto, una plantilla universal para toda la vida. Esta diversidad no implica inmunidad al daño ni ausencia de peligros ambientales. [1]

En el nivel celular, los investigadores examinan cambios que interactúan en genomas, proteínas, orgánulos, comunicación y renovación. El marco ampliado de rasgos distintivos organiza doce procesos candidatos. Proporciona una forma de investigar conexiones, no un reloj único que explique el ritmo de envejecimiento de todos los organismos. [2]

También importa la unidad que se sigue. Un mamífero, un árbol y un organismo que crece clonalmente pueden no ofrecer la misma respuesta sencilla a «¿Qué edad tiene el individuo?». Las comparaciones necesitan una definición clara antes de interpretar una diferencia aparente. Los mecanismos de deterioro y las explicaciones evolutivas del mantenimiento también responden a preguntas distintas.

Los seres vivos envejecen de manera diferente porque difieren su organización, mantenimiento, desarrollo y circunstancias, mientras que nuestras observaciones también dependen de lo que medimos. La demografía comparada establece la diversidad; hacen falta experimentos para identificar causas particulares. Ni una clasificación de longevidades ni una lista de cambios moleculares proporcionan la explicación completa. [1,2]

Notas técnicas (opcionales)

Un riesgo condicionado a haber sobrevivido

La mortalidad a una edad especificada se refiere a los individuos que siguen vivos a esa edad. Es distinta de la fracción de la población original que ya ha muerto. Una curva de supervivencia puede disminuir continuamente aunque el riesgo de cada individuo superviviente sea constante.

Consideremos una población inventada en la que cada superviviente tiene una probabilidad del 10 por ciento de morir durante cada intervalo anual, con independencia de la edad. Partiendo de 1 000 individuos, el número esperado tras diez intervalos es $1\,000 \times 0,9^{10}$, aproximadamente 349. Muchos han muerto, pero el modelo no incluye

ningún aumento del riesgo con la edad. Por tanto, una disminución del número de supervivientes no demuestra por sí sola senescencia demográfica.

Comparemos ahora una población cuyo riesgo anual aumenta de un intervalo al siguiente. Su patrón por edades contiene un fenómeno distinto, aunque ambas poblaciones tengan por casualidad la misma duración media de vida. Un único promedio condensa información que el patrón específico por edad conserva.

Referencias

[1] O. R. Jones et al. Diversity of ageing across the tree of life. *Nature* 505, 169–173 (2014). <https://doi.org/10.1038/nature12789>

[2] C. López-Otín, M. A. Blasco, L. Partridge, M. Serrano and G. Kroemer. Hallmarks of aging: An expanding universe. *Cell* 186, 243–278 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.11.001>

¿Por qué necesitamos dormir?

Dormir es algo más que permanecer inmóvil. En los seres humanos, los registros de actividad cerebral y otras señales distinguen fases del sueño, entre ellas el sueño de movimientos oculares rápidos y el de movimientos oculares no rápidos. Hay que identificar el estado antes de comprobar qué cambia durante él. [1]

Las comparaciones con otros animales amplían la pregunta. Un trabajo sobre la medusa *Cassiopea* describió un estado similar al sueño con menor capacidad de respuesta y cambios después de una perturbación nocturna. Eso respalda una comparación conductual acotada; no muestra que una medusa sueñe ni que comparta todas las funciones del sueño humano. [2]

La evidencia vincula el sueño con el aprendizaje, la memoria, la atención y la regulación fisiológica. Estas funciones diversas hacen arriesgado anunciar una actividad como la única razón por la que existe el sueño. Un proceso puede ocurrir durante el sueño, beneficiarse de él o ayudar a explicar su mantenimiento evolutivo. Son relaciones distintas que hay que demostrar. [3]

La eliminación de sustancias del cerebro ilustra la dificultad. Un estudio en ratones asoció el sueño y la anestesia con cambios en el espacio intersticial y una mayor eliminación de una sustancia estudiada. Un trabajo posterior con trazadores fluorescentes en ratones machos describió una menor eliminación en sus condiciones. Los resultados no pueden reducirse a un eslogan sencillo sobre lavar el cerebro. [4,5]

El trabajo posterior también motivó una crítica metodológica y una respuesta publicada. Ambas partes deben permanecer visibles al tratar el desacuerdo. Las diferencias en mediciones y supuestos necesitan investigación; la disputa no anula la evidencia más amplia de que el sueño importa para el funcionamiento normal. [6,7]

La respuesta es plural: los estados recurrentes de sueño contribuyen a procesos cognitivos y fisiológicos importantes, mientras que la distribución de funciones entre fases, especies y mecanismos sigue estudiándose. La eliminación mediante fluidos cerebrales es una controversia mecánica activa dentro de ese panorama más amplio, y tanto la crítica como la respuesta forman parte de la evidencia que hay que evaluar. [1,3-7]

Referencias

- [1] National Heart, Lung, and Blood Institute. How Sleep Works: Sleep Phases and Stages. <https://www.nhlbi.nih.gov/health/sleep/stages-of-sleep>
- [2] R. D. Nath et al. The Jellyfish *Cassiopea* Exhibits a Sleep-like State. *Current Biology* 27, 2984–2990.e3 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.08.014>
- [3] National Heart, Lung, and Blood Institute. How Sleep Works: Why Is Sleep Important? <https://www.nhlbi.nih.gov/health/sleep/why-sleep-important>
- [4] L. Xie et al. Sleep Drives Metabolite Clearance from the Adult Brain. *Science* 342, 373–377 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1241224>
- [5] A. Miao et al. Brain clearance is reduced during sleep and anesthesia. *Nature Neuroscience* 27, 1046–1050 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41593-024-01638-y>
- [6] V. Plá et al. A curious concept of CNS clearance. *Nature Neuroscience* 28, 731–733 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41593-025-01897-3>
- [7] N. P. Franks and W. Wisden. Reply to: A curious concept of CNS clearance. *Nature Neuroscience* 28, 734–736 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41593-025-01898-2>

¿Por qué no notamos el punto ciego de nuestra visión?

Un hueco en la retina no aparece como una pequeña mancha negra en la visión ordinaria. En el punto ciego no existe la muestra local correspondiente de fotorreceptores. Eso es distinto de que un detector registre negro. La distinción cambia lo que debemos explicar: la experiencia de una superficie continua pese a la ausencia de entrada local. [1]

Usar ambos ojos ayuda porque sus puntos ciegos no ocupan el mismo lugar en el campo combinado. Pero también puede haber continuidad con un ojo tapado. El segundo ojo no puede ser, por tanto, toda la explicación. Un caso monocular controlado pregunta qué puede hacer el procesamiento con la información circundante.

El color, el brillo y la textura pueden percibirse a través del hueco con estímulos adecuados. «Relleno perceptivo» nombra este fenómeno y las preguntas que plantea. No tiene por qué significar que un pintor en miniatura complete una imagen interna. La tarea es identificar cómo contribuyen las señales disponibles a la superficie percibida. [2]

Los registros en macacos despiertos aportan una observación fisiológica más acotada. Los investigadores examinaron la parte de la corteza visual primaria correspondiente al punto ciego. Algunas neuronas respondían allí a superficies grandes y tenían campos receptivos que se extendían más allá del punto ciego. Estas mediciones conectan la estimulación circundante con la actividad en la representación relevante. [1]

Una respuesta neuronal no es en sí misma una explicación completa de la experiencia consciente. Su interpretación requiere las condiciones del estímulo y la evidencia perceptiva. El relleno tampoco establece que la visión sea una invención arbitraria. El entorno disponible restringe lo que se percibe, y ciertos estímulos revelan los límites de esa compleción. [1,2]

Normalmente no advertimos el punto ciego porque la experiencia visual se organiza a partir de la información disponible, en lugar de presentarse como un mapa de los receptores ausentes. La cobertura binocular y el procesamiento de las señales circundantes contribuyen en circunstancias diferentes. La coherencia es real como experiencia, mientras que la ausencia de medición local sigue siendo real anatómicamente.

Notas técnicas (opcionales)

Una consecuencia geométrica de una dirección fija

El punto ciego se sitúa en coordenadas del campo visual relativas a la mirada, no en una marca física fija sobre una página. Un ejemplo geométrico sencillo muestra por qué importa la distancia al proyectar un vacío retiniano sobre una superficie plana.

Solo como ilustración, elijamos una dirección situada a 15 grados de la fijación y una página a 30 centímetros del ojo, perpendicular a la línea de visión. El desplazamiento horizontal sobre la página es $30 \tan(15^\circ)$, aproximadamente 8,0 centímetros. A 60 centímetros, es de unos 16,1 centímetros. Estos números describen la geometría elegida, no una localización del punto ciego medida para todas las personas.

Cambiar la distancia de observación cambia qué punto físico se proyecta en esa dirección. Mirar directamente un objetivo que antes faltaba también modifica su localización retiniana. Esos cambios no hacen desaparecer el punto ciego anatómico; desplazan la imagen respecto a él. La distinción evita confundir un objetivo en movimiento o un cambio de mirada con una recuperación de receptores.

Referencias

- [1] H. Komatsu, M. Kinoshita and I. Murakami. Neural Responses in the Retinotopic Representation of the Blind Spot in the Macaque V1 to Stimuli for Perceptual Filling-In. *Journal of Neuroscience* 20, 9310-9319 (2000). <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-24-09310.2000>
- [2] H. Komatsu. The neural mechanisms of perceptual filling-in. *Nature Reviews Neuroscience* 7, 220-231 (2006). <https://doi.org/10.1038/nrn1869>

¿Pueden dos luces distintas parecer del mismo color?

Dos luces pueden parecer iguales aunque contengan mezclas diferentes de longitudes de onda. Un espectrómetro puede distinguirlas incluso cuando una comparación de color no lo hace. Esa igualación se llama metamerismo. Muestra que igualar el aspecto bajo condiciones especificadas no equivale a igualar el espectro físico. [1]

Para la igualación tricromática ordinaria de colores, un punto de partida útil son las tres clases de fotorreceptores llamados conos. Sus sensibilidades se solapan. Una clase de cono no identifica una longitud de onda ni envía una etiqueta sencilla que diga «rojo», «verde» o «azul». Su respuesta combina contribuciones de la luz que le llega. [2]

Esa combinación pierde información. Espectros distintos pueden producir valores de respuesta coincidentes en el modelo aunque sus distribuciones detalladas difieran. Las notas técnicas construyen un ejemplo deliberadamente sencillo de esa pérdida. Demuestra una posibilidad, no reproduce todas las características de un observador real.

El observador forma parte de las condiciones. Una igualación predicha para un observador estándar no está garantizada para todas las personas con visión cromática normal. La CIE describe explícitamente diferencias que pueden aparecer al sustituir uno de esos observadores por otro. «Parecen iguales» necesita, por tanto, una respuesta a «¿Para quién y en qué comparación?». [3]

La pintura añade otra condición porque la luz reflejada depende tanto de la iluminación como del material. Una igualación bajo una fuente de luz no tiene por qué persistir bajo otra. Eso no significa que la comparación anterior fuera descuidada; ha cambiado el estímulo físico que llega a los ojos.

El metamerismo es un límite de la información que conserva la igualación de colores, no la afirmación de que toda luz sea indistinguible. Explica cómo resultados físicos diferentes pueden producir una igualación útil y por qué esa igualación no debe extenderse más allá de las condiciones en las que se estableció.

Notas técnicas (opcionales)

Tres sensibilidades que se solapan

Para la igualación tricromática ordinaria del color en visión fotópica, un modelo parte de las tres clases de conos fotorreceptores. Sus sensibilidades espectrales se solapan. Una clase de conos no informa de una sola longitud de onda, y su respuesta no es una etiqueta que diga rojo, verde o azul. El Colour and Vision Research Laboratory proporciona funciones de sensibilidad de los conos utilizadas para cuantificar estas respuestas solapadas. [2]

En un modelo lineal de excitación, la señal de la clase de conos i es proporcional a la integral de $P(\lambda)$ multiplicada por $s_i(\lambda)$, donde P describe el espectro incidente y s_i la sensibilidad pertinente. Espectros distintos pueden dar las mismas tres integrales. La precisión «modelo lineal de excitación» importa: es un modelo de excitación de receptores para la igualación, no una teoría completa de la apariencia visual, la adaptación o el procesamiento neural.

La pérdida de información puede entenderse sin calcular una respuesta real de conos. Supongamos que un instrumento deliberadamente simplificado tiene tres sensores y cuatro canales espectrales estrechos. Su matriz de respuesta tiene tres filas y cuatro columnas. El álgebra lineal garantiza un cambio no nulo en las cuatro intensidades de los canales que deja inalteradas las tres salidas, siempre que ese cambio pertenezca al núcleo de la matriz. Partiendo de intensidades de canal suficientemente positivas, un cambio lo bastante pequeño puede mantener todas las intensidades no negativas. Dos espectros físicamente admisibles comparten entonces un vector de salida.

Esta construcción es una ilustración matemática, no una afirmación de que cuatro lámparas cualesquiera produzcan una coincidencia perfecta para todos los observadores humanos. Identifica la razón estructural por la que unas pocas mediciones ponderadas no pueden reconstruir de forma única un espectro sin restricciones.

Un ejemplo calculado de información perdida

Tomemos salidas hipotéticas de sensores $x_1 + x_4$, $x_2 + x_4$ y $x_3 + x_4$. El espectro representado por intensidades de canal (2, 2, 2, 1) da (3, 3, 3). El espectro diferente (1, 1, 1, 2) también da (3, 3, 3). Incluso sus intensidades totales difieren: siete unidades frente a cinco. Los sensores no son medidores de potencia total, por lo que esa diferencia no contradice la igualdad de salidas.

Estas sensibilidades inventadas no son las funciones fundamentales de los conos humanos. Su finalidad es permitir examinar el problema inverso. Conocer las tres salidas no nos dice qué cuatro entradas las generaron. Un espectrómetro calibrado con más mediciones espectrales independientes podría distinguir la pareja, aunque este instrumento de tres canales no pueda.

La igualación real del color añade restricciones fisiológicas y experimentales. Una coincidencia numérica para un observador estándar es una predicción para un modelo definido de observador. No es una garantía para cada persona. La CIE trata explícitamente las diferencias de color causadas por sustituir al observador estándar por otro observador con visión normal del color. [3]

Referencias

[1] CIE. International Lighting Vocabulary, término 17-23-006: metamerism.

<https://cie.co.at/eilvterm/17-23-006>

[2] Colour and Vision Research Laboratory. Human cone spectral sensitivities or cone fundamentals.

<https://www.cvrl.org/cones.htm>

[3] CIE. Special metamerism index: Change in observer.

<https://www.cie.co.at/publications/special-metamerism-index-change-observer>

¿Por qué un olor puede evocar un recuerdo?

Un olor puede asociarse a un acontecimiento y actuar después como clave para recordarlo. La sensación de volver a ese momento puede ser intensa. Pero el acceso a un recuerdo, la emoción que suscita y su exactitud factual son resultados separados, y una sensación intensa no mide los tres.

Un experimento informativo separa la selección de un recuerdo del efecto de una clave sobre él. Herz y Schooler utilizaron primero una etiqueta verbal para suscitar un recuerdo autobiográfico y después presentaron una clave sensorial, una vez seleccionado. Observaron un efecto sobre las valoraciones emocionales en la condición olfativa. [1]

Ese diseño acota la inferencia. Un cambio en cómo se siente el acontecimiento seleccionado no tiene por qué significar que el olfato recupere más acontecimientos ni que el recuerdo sea más exacto. La medida nos dice algo sobre la experiencia de recordar en esas condiciones.

Otro estudio comparó la recuperación autobiográfica multimodal. Entre sus cuatro condiciones de claves no encontró diferencias en el número de recuerdos recuperados ni en las valoraciones de la experiencia. Ese resultado limita una afirmación universal de que una clave olfativa deba producir siempre un recuerdo más intenso. La tarea y la comparación afectan a la respuesta. [2]

Una explicación biológica también necesita algo más que el nombre de una región cerebral. Debe conectar el procesamiento de la clave, las asociaciones aprendidas y el resultado medido. De lo contrario, una etiqueta anatómica solo vuelve a decir dónde ocurre cierta actividad sin explicar por qué esta clave ayuda a recuperar este recuerdo.

El olfato puede ser una vía potente hacia la experiencia recordada, pero no es un dispositivo de verificación. Comprobar la veracidad de un recuerdo requiere evidencia más allá de su viveza. La explicación científica conserva la fuerza de la experiencia y, a la vez, distingue la sensación, la recuperación y la exactitud.

Referencias

- [1] Herz, R. S., and Schooler, J. W. A naturalistic study of autobiographical memories evoked by olfactory and visual cues: testing the Proustian hypothesis. *American Journal of Psychology* 115(1), 21-32 (2002). <https://doi.org/10.2307/1423672>
- [2] Willander, J., Sikström, S., and Karlsson, K. Multimodal retrieval of autobiographical memories: sensory information contributes differently to the recollection of events. *Frontiers in Psychology* 6, 1681 (2015). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01681>

¿Por qué una hora puede parecernos corta o larga?

Una hora del reloj puede sentirse distinta de otra sin que ninguno de los relojes funcione de manera diferente. La pregunta concierne a un juicio sobre la duración. Incluso aquí caben varios juicios: sentir que el tiempo pasó deprisa no equivale necesariamente a estimar después un intervalo corto.

Un experimento cambia cuando los participantes saben de antemano que van a juzgar el tiempo. En una tarea prospectiva pueden seguir la duración mientras hacen otra cosa. En una tarea retrospectiva solo se enteran después de que deben juzgar el tiempo. Su respuesta depende entonces de lo que el intervalo dejó en la memoria, sin la misma instrucción de prestar atención al tiempo. [1]

Una síntesis de 117 experimentos encontró efectos opuestos al aumentar la carga cognitiva en estos dos contextos. Una carga mayor redujo la razón entre duración subjetiva y objetiva en las tareas prospectivas, pero la aumentó en las retrospectivas. La variabilidad relativa prospectiva también aumentó, sin el mismo patrón en los resultados retrospectivos. [1]

Una explicación atencional interpreta el resultado prospectivo en términos de demandas que compiten: la atención dedicada a otra tarea deja menos disponible para estimar el tiempo. Una explicación basada en la memoria destaca los cambios y la información contextual disponibles después. Son explicaciones de patrones contrastantes, no la afirmación de que un cronómetro interno produzca todos los juicios. [1]

Los episodios cotidianos son más difíciles de clasificar que las tareas controladas. El interés, las expectativas y el recuerdo posterior pueden variar conjuntamente. Una historia familiar sobre aburrimiento o disfrute no identifica qué variable causó el juicio si la comparación no las separa.

La respuesta empieza, por tanto, por el momento en que se plantea la propia pregunta. Aquello a lo que prestamos atención durante un intervalo y lo que podemos reconstruir después no tienen por qué producir la misma estimación. Una hora medida sigue siendo una hora, mientras que la evidencia utilizada para juzgarla puede ser distinta.

Referencias

[1] Block, R. A., Hancock, P. A., and Zakay, D. How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica* 134(3), 330–343 (2010).
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.03.006>

¿Cómo aprenden los niños palabras que nadie les ha enseñado?

El habla no llega con espacios impresos entre las palabras. Un niño que oye un lenguaje que todavía no conoce primero debe encontrar secuencias de sonidos recurrentes y después conectar algunas con significados. Son problemas distintos: reconocer una secuencia no identifica todavía a qué se refiere.

En un experimento controlado, bebés de ocho meses escucharon una corriente de habla artificial. Las relaciones estadísticas entre sílabas vecinas proporcionaban información sobre posibles límites, y los bebés distinguieron después secuencias. El resultado demuestra aprendizaje en una tarea de segmentación, no comprensión de los elementos como nombres de objetos. [1]

La denominación plantea otra ambigüedad. Una palabra oída mientras hay varias cosas visibles podría referirse a cualquiera de ellas, o a una propiedad o acción en lugar de un objeto. Un encuentro quizá no resuelva la cuestión. Sin embargo, a través de varios encuentros algunas relaciones candidatas pueden repetirse mientras otras desaparecen.

Smith y Yu estudiaron bebés de doce y catorce meses con emparejamientos de palabras y escenas que eran ambiguos por separado. Los bebés aprendieron correspondencias a través de esos emparejamientos, lo que respalda la posibilidad de que la información se acumule entre situaciones. Un encuentro aislado no necesita contener una lección explícita para que una secuencia de encuentros contenga evidencia útil. [2]

Las notas ofrecen un pequeño ejemplo de esa acumulación. Aísla una fuente de información y no debe confundirse con un modelo completo del aprendizaje del lenguaje. La interacción y la estructura del entorno proporcionan algo más que una cantidad indiferenciada de palabras, y aprender un significado requiere más que emparejar un sonido una vez.

Los niños pueden aprender sin una explicación formal porque la propia experiencia contiene relaciones que pueden detectarse y comprobarse en distintas ocasiones. Los dos experimentos establecen capacidades particulares en condiciones controladas. No muestran que la estadística por sí sola explique una lengua entera, pero sí por qué «no enseñado explícitamente» no significa «sin información recibida». [1,2]

Notas técnicas (opcionales)

Un pequeño caso de acumulación de evidencia

Consideremos a un aprendiz simplificado que oye la misma etiqueta en tres escenas. Los objetos candidatos son A y B, después A y C y después A y D. Bajo los supuestos explícitos de que la etiqueta designa exactamente un objeto estable y de que su referente aparece en todas las escenas, la intersección de los tres conjuntos candidatos es A. Ninguna escena aislada resolvió la correspondencia; la combinación sí.

Es una ilustración lógica, no el algoritmo establecido por el estudio con bebés. Si se relaja un supuesto, la respuesta puede cambiar. Si un adulto se refiere a veces a un objeto ausente, la intersección simple puede fallar. Si la etiqueta describe una propiedad compartida por varios objetos, buscar solo un objeto define un espacio de búsqueda equivocado. Si A y B siempre aparecen juntos, las observaciones no deciden entre ellos.

Esas limitaciones son científicamente productivas. Muestran qué debe añadir un modelo para manejar situaciones naturales: una representación de los significados posibles, una forma de afrontar información ausente o engañosa y alguna explicación de lo que se retiene. Un aprendiz de juguete exitoso establece una posibilidad bajo supuestos, no una explicación completa del desarrollo.

Referencias

- [1] Saffran, J. R., Aslin, R. N., and Newport, E. L. Statistical learning by 8-month-old infants. *Science* 274(5294), 1926–1928 (1996). <https://doi.org/10.1126/science.274.5294.1926>
- [2] Smith, L., and Yu, C. Infants rapidly learn word-referent mappings via cross-situational statistics. *Cognition* 106(3), 1558–1568 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.06.010>

¿Cómo pueden orientarse las aves sobre un océano?

Un ave que regresa a través de un océano ha resuelto un problema de navegación, pero su llegada no revela cómo. Una brújula proporciona una dirección. Un sistema semejante a un mapa proporciona información sobre la ubicación respecto a un destino. Un ave desplazada inesperadamente de su ruta puede necesitar algo más que conservar su rumbo anterior.

Los experimentos de desplazamiento permiten poner a prueba esa distinción. Los investigadores trasladaron pardelas cenicientas que anidaban en las Azores y las liberaron en mar abierto, a unos ochocientos kilómetros de la colonia. Las aves privadas del olfato sufrieron grandes dificultades de orientación y regreso, mientras que las sometidas a perturbaciones magnéticas se comportaron de manera similar a los controles en ese experimento. [1]

La intervención respalda una función de la información olfativa en esas condiciones. No establece el mecanismo completo de un mapa olfativo ni muestra que la información magnética nunca importe para ninguna ave. Parte de la fuerza de un experimento reside en mantener su conclusión dentro de la comparación realmente realizada.

Los patrones de vuelo añaden otra línea de evidencia. Puede examinarse su relación con las hipótesis de mapas olfativos, pero el análisis pertinente distingue explícitamente entre un regreso dificultado por la pérdida de olfato y una demostración completa del uso de un mapa. Una contribución necesaria y un sistema de navegación completamente especificado son logros diferentes. [2]

La detección magnética tiene su propia evidencia. Un trabajo sobre el criptocromo 4 del petirrojo europeo encontró fotoquímica sensible al magnetismo in vitro, con comparaciones de proteínas y mutaciones relevantes para los procesos de pares radicales. Ese resultado concierne a un mecanismo molecular candidato. No conecta por sí solo la molécula con cada decisión de un ave en vuelo libre. [3]

La navegación oceánica no se explica, por tanto, nombrando un único sentido ni llamando «instinto» al resultado. Distintas evidencias abordan claves, mecanismos y conducta en niveles diferentes. Conectar esos niveles requiere comprobaciones, mientras que la importancia precisa de una clave puede depender de la especie, el entorno y la tarea.

Referencias

- [1] Gagliardo, A., et al. Oceanic navigation in Cory's shearwaters: evidence for a crucial role of olfactory cues for homing after displacement. *Journal of Experimental Biology* 216, 2798–2805 (2013). <https://doi.org/10.1242/jeb.085738>
- [2] Reynolds, A. M., et al. Pelagic seabird flight patterns are consistent with a reliance on olfactory maps for oceanic navigation. *Proceedings of the Royal Society B* 282, 20150468 (2015). <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0468>
- [3] Xu, J., et al. Magnetic sensitivity of cryptochrome 4 from a migratory songbird. *Nature* 594, 535–540 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03618-9>

¿Cómo reconocemos la inteligencia de un animal muy diferente de nosotros?

Un animal poco familiar puede fracasar en una tarea por razones ajenas a la capacidad que pretendíamos evaluar. El aparato puede resultar difícil de ver, manipular o abordar, o la recompensa puede no motivarlo. Una comparación de inteligencia empieza por esas preguntas prácticas, no por una clasificación de especies.

Un objetivo más preciso podría ser aprender una relación, inhibir un movimiento ineficaz o transferir una solución. Cada capacidad necesita una tarea operativa y controles. Utilizar el mismo aparato para todas las especies no garantiza que todas afronten el mismo problema.

Una comparación amplia evaluó a 567 individuos de treinta y seis especies mediante dos tareas sobre autocontrol. Dentro de esa muestra, el volumen cerebral absoluto fue el predictor del rendimiento más fuerte entre las medidas de tamaño cerebral. El resultado describe una comparación definida, no establece una escala universal de todas las capacidades cognitivas. [1]

Evaluaciones posteriores de cuervos comunes, cuervos de Nueva Caledonia y grajillas en una tarea de cilindro encontraron un rendimiento comparable al de los grandes simios pese a sus cerebros más pequeños. Los autores distinguieron la autorregulación motora de formas más exigentes de autocontrol, como renunciar a una recompensa inmediata a cambio de otra aplazada. Esa distinción evita que el éxito en una tarea se amplíe silenciosamente hasta una afirmación mucho más extensa. [2]

Una evidencia más sólida pregunta qué se transfiere cuando cambian los detalles superficiales, si estrategias más sencillas explican el éxito y si el fracaso aparente refleja restricciones sensoriales o motoras. Los controles forman parte de la explicación porque determinan a qué capacidad puede atribuirse razonablemente el resultado.

Reconocer la inteligencia en animales distintos implica construir perfiles de capacidades evaluadas, no otorgar una única corona. El rendimiento puede aportar evidencia sobre la cognición y dejar sin responder las preguntas sobre la experiencia subjetiva. Una tarea bien diseñada acota la interpretación lo suficiente como para hacer significativa la comparación.

Referencias

[1] MacLean, E. L., et al. The evolution of self-control. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(20), E2140–E2148 (2014). <https://doi.org/10.1073/pnas.1323533111>

[2] Kabadayi, C., et al. Ravens, New Caledonian crows and jackdaws parallel great apes in motor self-regulation despite smaller brains. *Royal Society Open Science* 3, 160104 (2016). <https://doi.org/10.1098/rsos.160104>

¿Por qué puede un público empezar a aplaudir al mismo ritmo?

Un público puede empezar con aplausos irregulares y establecer un pulso compartido. Las manos individuales siguen separadas, de modo que el orden debe surgir de la manera en que las personas ajustan sus tiempos. Llamar sincronización al resultado describe lo que ocurrió; la explicación también debe dar cuenta de cómo empieza y por qué puede desaparecer.

Las mediciones de aplausos rítmicos encontraron una alternancia de fases sincronizadas y no sincronizadas. Un ritmo individual de palmadas más lento, descrito como duplicación del período, estaba asociado al modo sincronizado. Los estudios analizaron este comportamiento mediante ideas de osciladores acoplados. [1,2]

Reducir la velocidad no basta. Las personas también deben hacer coincidir sus palmadas, y sus frecuencias preferidas deben estar lo bastante próximas para que los ajustes disponibles superen las diferencias. La investigación sobre los aplausos conectó el modo más lento con una distribución de frecuencias individuales más favorable a la sincronización. [2]

Las notas técnicas empiezan con un modelo de dos personas y después describen una medida de la coordinación temporal colectiva. Estas herramientas separan la coincidencia temporal de la intensidad sonora total. Un público puede sonar fuerte sin estar coordinado, y un pulso muy definido no nos dice todo sobre la intensidad de los aplausos.

Los estudios interpretan la alternancia como una tensión entre la sincronización y el deseo de producir aplausos más intensos. Es una explicación de una conducta medida, no una ley psicológica universal. Un público que recibe instrucciones, un público al aire libre y una sala de conciertos no tienen por qué mostrar dinámicas idénticas. [1,2]

La clave es el ajuste mutuo bajo restricciones. Los individuos no necesitan volverse idénticos para que se forme un ritmo colectivo, pero las diferencias y el acoplamiento deben permitir la coordinación. Cuando cambia ese equilibrio, el pulso puede disolverse aunque todos sigan aplaudiendo.

Notas técnicas (opcionales)

Un modelo de dos personas

Un modelo hipotético sencillo de fases hace explícita la competencia. Sea δ la diferencia de fase entre dos personas que aplauden. Supongamos que su tasa de cambio es $\dot{\delta} = \Delta\omega - 2K \sin(\delta)$, donde $\Delta\omega$ es la diferencia entre sus frecuencias angulares preferidas y K es un parámetro de acoplamiento positivo. El término seno es una tendencia idealizada a reducir el desajuste de fase.

Una diferencia de fase fija exige $\sin(\delta) = \Delta\omega/(2K)$. Solo puede existir cuando el valor absoluto de $\Delta\omega$ no es mayor que $2K$. Si los ritmos preferidos difieren demasiado, este modelo no puede mantener una relación de fase fija, por mucho tiempo que se espere. Esa conclusión está condicionada al modelo; no es un umbral medido en públicos reales.

Por ejemplo, con $\Delta\omega = 1$ radián por segundo y $K = 1$ por segundo, $\delta = \pi/6$ es un equilibrio. La derivada del lado derecho en ese punto es $-2K \cos(\pi/6)$, que es negativa, por lo que las desviaciones pequeñas decaen en este sistema idealizado. No hacen falta frecuencias iguales para el bloqueo de fase, y el bloqueo no tiene por qué significar una diferencia de fase nula.

Este cálculo expone lo que aporta la palabra «acoplamiento»: la interacción debe ser suficientemente fuerte, en relación con el desajuste, para evitar una deriva continua. Un público de muchas personas añade conexiones variables, retardos, ruido y decisiones deliberadas. La ecuación de dos personas es un ejemplo explicativo, no un ajuste a los datos citados de salas de conciertos.

Una medida de la coordinación temporal colectiva

Una posible medida estadística de sincronización representa la fase de cada individuo mediante una flecha unitaria sobre un círculo y calcula la media de las flechas. El módulo R de esa media va de cero a uno. Si todas las fases son idénticas, R vale uno. Si dos grupos iguales tienen fases exactamente opuestas, sus flechas se cancelan y R vale cero.

El segundo ejemplo muestra una limitación: $R = 0$ no significa necesariamente ausencia de estructura. Dos grupos opuestos perfectamente organizados también dan cero. Una medida diseñada para detectar una fase compartida puede pasar por alto otros patrones organizados. Del mismo modo, medir solo la señal del micrófono no revela directamente la fase de cada individuo.

Por tanto, una buena explicación relaciona la medición con la pregunta. ¿Buscamos un pulso común, varios grupos que alternan, un agrupamiento temporal o simplemente un aumento de la regularidad? Patrones distintos pueden requerir observables distintos.

Referencias

- [1] Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T., and Barabási, A. L. The sound of many hands clapping. *Nature* 403, 849–850 (2000). <https://doi.org/10.1038/35002660>
- [2] Néda, Z., Ravasz, E., Vicsek, T., Brechet, Y., and Barabási, A. L. Physics of the rhythmic applause. *Physical Review E* 61, 6987–6992 (2000). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.6987>

¿Cómo podemos entender el habla en una sala ruidosa?

En una sala ruidosa, cada oído recibe una mezcla, no una grabación separada de cada hablante. Seguir una voz requiere información acústica útil y una forma de organizarla o seleccionarla. El problema no siempre se resuelve aumentando el volumen de todo.

Algunas interferencias vuelven inaccesibles partes de la señal del habla. Otras dejan los sonidos audibles, pero dificultan separar sus fuentes o atender a ellas. La investigación distingue el enmascaramiento energético del informacional para recoger esa diferencia. La separación espacial, las diferencias entre voces y la atención pueden afectar a la tarea de maneras distintas. [1]

Esa distinción explica por qué la audibilidad y la comprensión pueden separarse. Oír que alguien habló no garantiza que se hayan recuperado las palabras, y recuperar sonidos aislados no garantiza que se hayan asignado al hablante deseado. Una medida del nivel sonoro no puede resolver por sí sola esas preguntas.

Los registros neuronales aportan evidencia sobre la selección. Mesgarani y Chang registraron actividad cortical mientras los participantes atendían a uno de dos hablantes simultáneos. Las reconstrucciones a partir de la corteza auditiva no primaria destacaban características del habla atendida, y un clasificador decodificaba las palabras atendidas y la identidad del hablante. [2]

El hallazgo concierne a una representación medida en esas condiciones. No significa que la señal desatendida desaparezca de todas las etapas de procesamiento ni que un decodificador capture todo lo que experimenta quien escucha. El ejemplo numérico de las notas también describe una relación señal-ruido, no una puntuación completa de comprensión.

El contexto y las expectativas pueden ayudar a interpretar una entrada incompleta, pero también pueden conducirnos a una palabra incorrecta. Comprender el habla entre ruido depende de la evidencia disponible y de su uso selectivo. La capacidad es notable precisamente porque la entrada está mezclada, y sigue siendo limitada cuando no puede recuperarse la información necesaria.

Notas técnicas (opcionales)

¿Qué llega a los oídos?

Una grabación simplificada en un micrófono puede escribirse como $x(t) = s(t) + n(t)$, donde s es la señal objetivo y n todo lo clasificado como interferencia. Esa notación no revela qué forma de onda es el objetivo. Sin restricciones adicionales, infinitos pares pueden producir la misma suma: añadir cualquier forma de onda q a s y restarla de n deja x sin cambio.

El ejemplo es un problema inverso. La recuperación solo se hace posible cuando más información restringe las alternativas. Los dos oídos proporcionan mezclas diferentes; las diferencias de ubicación y de características de la voz pueden ayudar a organizarlas; la estructura aprendida del habla aporta regularidades adicionales. Por tanto, la entrada acústica es difícil sin carecer por completo de restricciones.

Llamar ruido a un componente también expresa una tarea. La conversación de otra persona puede ser la interferencia en un momento y el objetivo en el siguiente. El sonido subyacente no ha perdido su significado. Ha cambiado el objetivo del oyente.

Una razón numérica de significado limitado

Una medida física habitual es la relación de potencias señal-ruido, expresada como $10 \log_{10}(P_s/P_n)$ decibelios. En una mezcla hipotética con potencia objetivo de una unidad y potencia de interferencia de cuatro unidades, la relación es de unos $-6,02$ dB. El signo negativo significa que la potencia objetivo es menor que la de interferencia según las definiciones elegidas.

No significa que la comprensión deba ser nula. Tampoco duplicar la potencia objetivo garantiza un incremento fijo del porcentaje de palabras entendidas. La relación no dice nada por sí sola sobre la superposición espectral, la disposición espacial, la semejanza lingüística ni la audición del oyente. Un resumen físico y una puntuación conductual responden a preguntas distintas.

Incluso las potencias necesitan una regla explícita de medición. Promediar a lo largo de pausas prolongadas puede producir un número diferente del que se obtiene al medir solo los períodos en que habla la persona objetivo. Dos relaciones que se presentan son comparables solo si las definiciones y las condiciones justifican la comparación. La precisión de un número no puede subsanar un denominador sin especificar.

Referencias

- [1] Wang, X., and Xu, L. Speech perception in noise: Masking and unmasking. *Journal of Otology* 16(2), 109–119 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.joto.2020.12.001>
- [2] Mesgarani, N., and Chang, E. F. Selective cortical representation of attended speaker in multi-talker speech perception. *Nature* 485, 233–236 (2012). <https://doi.org/10.1038/nature11020>

¿Existe un número primo mayor que todos los demás?

No existe un número primo máximo. No es una predicción basada en encontrar cada vez más. Se sigue de un argumento que muestra que cualquier lista finita que pretenda contener todos los primos debe estar incompleta. El argumento de divisibilidad de Euclides establece que el conjunto no está acotado. [1]

Un primo es un número entero mayor que uno cuyos únicos divisores positivos son uno y él mismo. Todo entero mayor que uno tiene un divisor primo: su menor divisor mayor que uno no puede ser compuesto, porque eso proporcionaría un divisor menor.

Tomemos ahora una lista de primos propuesta como completa. Multipliquemos sus elementos y sumemos uno. Al dividir el resultado por cualquiera de los primos de la lista, queda un resto de uno, por lo que ninguno de esos primos lo divide. Sin embargo, el resultado es mayor que uno y debe tener un divisor primo. Ese divisor no está en la lista.

La construcción no promete que el nuevo número sea primo. Puede ser compuesto y aun así tener un divisor primo ausente de la lista. Las notas ofrecen ejemplos de ambas posibilidades. Confundir el número construido con su divisor primo convierte una demostración válida en una receta inválida.

Si la lista inicial contiene todos los primos hasta un límite, un primo ausente debe superar ese límite. Si es solo una selección arbitraria, el primo ausente podría ser uno menor que se pasó por alto. La demostración necesita que la lista esté incompleta, no una afirmación injustificada sobre el orden de una lista arbitraria.

El mayor primo conocido es un registro del conocimiento en un momento dado; un primo máximo sería una propiedad de los enteros. El cálculo puede modificar el registro, mientras que la demostración descarta la segunda afirmación. Establece la existencia sin proporcionar un método eficiente para encontrar un primo de cada tamaño deseado.

Notas técnicas (opcionales)

¿Qué es un primo?

Aquí, un primo es un entero mayor que uno cuyos únicos divisores positivos son uno y él mismo. Así, dos y tres son primos, mientras que seis no lo es: dos y tres lo dividen. El número uno queda excluido por la definición. La pregunta se refiere a esta clase precisa de enteros positivos, no a lo grande que pueda ser un numeral escrito.

Un hecho preliminar hace funcionar el argumento: todo entero mayor que uno tiene un divisor primo. Para ver por qué, elijamos su divisor más pequeño mayor que uno. Si ese divisor fuera compuesto, tendría a su vez un divisor más pequeño mayor que uno, que también dividiría al número original. Esto contradice la elección del divisor más pequeño. Por tanto, el divisor elegido debe ser primo.

La demostración usa el orden de los enteros positivos y la divisibilidad ordinaria. No requiere que ya sepamos factorizar eficientemente un número enorme. La existencia de un divisor y un método práctico para encontrarlo con rapidez son cuestiones distintas.

Tomemos cualquier lista que se proponga como completa

Supongamos que alguien nos da una lista finita de todos los primos, desde p_1 hasta p_n . Multiplicamos todos sus elementos para obtener P y formamos $N = P + 1$. Cada primo de la lista divide exactamente a P . Por tanto, al dividir N por cualquiera de ellos queda resto uno.

En consecuencia, ningún primo de la lista divide a N . Sin embargo, N es mayor que uno y, por el argumento preliminar, tiene un divisor primo. Ese divisor no está en la lista propuesta como completa. La lista no podía estar completa.

Nada del razonamiento dependía de la lista finita con la que empezáramos. Eso es lo que da alcance a la demostración. No comprueba las primeras mil posibilidades y conjetura que el patrón continúa; proporciona una contradicción para cualquier afirmación finita de completitud. La construcción mediante el producto es una presentación moderna habitual del argumento de divisibilidad. [1]

El número que construimos no tiene por qué ser primo

Este es el punto donde a menudo falla una explicación por lo demás convincente. La demostración no dice que multiplicar primos consecutivos y sumar uno produzca siempre un primo. Dice que el resultado tiene un divisor primo que no está en la lista inicial.

Para la lista 2, 3 y 5, la construcción da 31, que es primo. Pero al usar 2, 3, 5, 7, 11 y 13 se obtiene 30 031, y $30\,031 = 59 \times 509$. Este ejemplo es compuesto y, aun así, hace exactamente lo que exige la demostración. Ni 59 ni 509 están entre los seis primos iniciales.

Un resultado compuesto no es una comprobación fallida del teorema. Es uno de los dos casos que admite el argumento. Confundir el entero construido con el nuevo divisor primo convierte una demostración válida en una receta inválida. La diferencia es pequeña en palabras y decisiva en lógica.

¿El nuevo primo tiene que ser mayor?

Si la lista inicial contiene realmente todos los primos hasta cierta cota, un divisor primo ausente debe superar esa cota. Si la lista es simplemente una selección arbitraria, el divisor ausente podría ser un primo menor que se omitió. Ambos casos son compatibles con la demostración.

Por tanto, el teorema refuta la existencia de un primo máximo del siguiente modo. Si existiera un primo máximo, todo primo estaría entre los enteros, en número finito, desde dos hasta ese valor. Podríamos enumerarlos y la construcción mostraría que la lista está incompleta. Esto contradice el supuesto.

Un ejercicio útil es distinguir «no está en esta lista» de «es mayor que todos los elementos de esta lista». Solo coinciden cuando la lista tiene la propiedad de completitud adecuada. Tener presente esa condición evita un paso oculto habitual en las presentaciones divulgativas.

Referencias

[1] Euclid. Elements, libro IX, proposición 20. Edición electrónica y comentarios de David E. Joyce, Clark University. <https://mathcs.clarku.edu/~djoyce/elements/bookIX/propIX20.html>

¿Cómo podemos saber que un nudo no se puede deshacer?

Un nudo que se resiste a tus dedos puede, aun así, deshacerse. La teoría matemática de nudos pregunta algo distinto: ¿puede un lazo cerrado convertirse en un círculo sin nudo, sin cortarlo ni hacer pasar un tramo a través de otro? Cerrar los extremos elimina la vía de escape de pasar un extremo suelto por el lazo. [1]

Un dibujo del lazo necesita información sobre qué tramo pasa por encima en cada cruce. Los cambios permitidos en esos diagramas incluyen tres movimientos locales de Reidemeister: crear o eliminar un rizo, crear o eliminar un par de cruces y deslizar un tramo por delante de un cruce. También se permite el movimiento en el plano. Para los nudos considerados aquí, los diagramas equivalentes pueden conectarse mediante estos movimientos. [1]

Eso proporciona una estrategia para demostrar que dos nudos son diferentes. Se busca una propiedad conservada por todos los movimientos permitidos y después se muestra que los dos diagramas tienen valores diferentes de esa propiedad. Intentar muchas manipulaciones sin éxito no demuestra imposibilidad, pero una propiedad conservada puede hacerlo.

La tricoloración ofrece un ejemplo. El nudo trébol admite una asignación no trivial de tres colores que satisface la regla de los cruces, mientras que un círculo sin cruces no la admite. La existencia de esa coloración se conserva bajo los movimientos permitidos. En consecuencia, el trébol no puede deformarse hasta ese círculo respetando las reglas. [1]

Las notas técnicas presentan la regla y por qué importa su comportamiento bajo un movimiento. Un invariante útil no tiene por qué ser un clasificador completo: no distinguir dos diagramas no demuestra que representen el mismo nudo. Nudos diferentes pueden coincidir en una propiedad que separa algún otro par.

La certeza está condicionada al objeto matemático y a las operaciones permitidas. Una cuerda real tiene grosor, rozamiento y extremos, lo que introduce otras preguntas. El resultado matemático es potente porque especifica exactamente qué significa «no puede deshacerse» antes de demostrarlo.

Notas técnicas (opcionales)

El color como criterio de estructura

Dividamos un diagrama en arcos que van de un paso por debajo al siguiente. Asignemos a cada arco uno de tres colores. En cada cruce, exijamos que los colores de los tres arcos incidentes sean todos iguales o todos distintos. Una coloración no trivial usa más de un color en algún lugar del diagrama.

El nudo trébol tiene un diagrama de tres arcos a los que se pueden asignar tres colores distintos cumpliendo la regla en cada cruce. Un círculo sin nudos, en su diagrama sin cruces, tiene un solo arco, por lo que no admite una coloración no trivial. El resultado útil es que la existencia de una coloración no trivial con tres colores se conserva bajo los movimientos de Reidemeister. [1]

Si se cumple esa conservación, la conclusión se sigue: un trébol no puede convertirse en un círculo sin cruces mediante las deformaciones permitidas. De lo contrario, una

secuencia de movimientos conservaría en cada paso la posibilidad de una coloración no trivial y llegaría a un diagrama que carece de ella. Eso es una contradicción.

Por qué la regla de coloración puede sobrevivir a un movimiento

Hay una forma algebraica de examinar la regla local. Etiquetemos los colores con 0, 1 y 2 y calculemos módulo tres. Si el arco que pasa por encima tiene color a y los dos arcos que pasan por debajo tienen colores b y c , la condición es $2a = b + c$ módulo tres. Los colores iguales la cumplen; tres colores distintos también.

Dados a y b , el color de continuación es, de forma única, $c = 2a - b$ módulo tres. Aplicar esa operación dos veces con el mismo color superior devuelve b , puesto que $2a - (2a - b) = b$. Esta es el álgebra que explica la reversibilidad cuando se introduce o elimina un par de cruces que se cancelan.

Para el movimiento de tres tramos, escribamos $f_a(b) = 2a - b$. La compatibilidad pertinente es $f_a(f_b(c)) = f_{-}(f_a(b))(f_a(c))$. Ambos lados se reducen a $2a - 2b + c$ módulo tres. Para un rizo, $f_a(a) = a$. Estas relaciones proporcionan la consistencia local necesaria para extender y retraer las coloraciones a través de los tres movimientos. También conservan las asignaciones de un único color, de modo que una coloración no trivial no puede desaparecer convirtiéndose inadvertidamente en una trivial.

El álgebra es valiosa porque sustituye la confianza en un dibujo complicado por ecuaciones que pueden comprobarse. Una demostración mediante diagramas sigue teniendo que asociar las ecuaciones con los movimientos y sus tramos; los símbolos no eliminan esa obligación de representación.

Referencias

[1] Hoberg, R. Knots and Braids. Trabajo del programa REU de la Universidad de Chicago, 26 de agosto de 2011, §3. <https://math.uchicago.edu/~may/VIGRE/VIGRE2011/REUPapers/Hoberg.pdf>

¿Puede una figura tener área finita y perímetro infinito?

El área y el perímetro miden características distintas de una figura. El área mide el espacio encerrado; el perímetro sigue el borde. Una construcción puede añadir detalles cada vez más finos a ese borde mientras el área encerrada adicional se hace progresivamente menor. El copo de nieve de Koch hace exacta esa distinción. [1]

Empecemos con un triángulo equilátero. Sustituyamos cada lado por cuatro segmentos, cada uno de un tercio de su longitud, formando un saliente triangular hacia fuera en el centro. Repitamos la misma operación en todos los segmentos. Cada etapa finita es una figura de perímetro finito, pero cada operación multiplica ese perímetro por cuatro tercios. [1]

Los triángulos añadidos se comportan de otra manera. Su número aumenta, pero sus áreas disminuyen lo bastante deprisa para que el área total añadida se aproxime a un límite finito. Las notas muestran la suma: el área límite es ocho quintos del área del triángulo original. En cambio, la longitud del borde crece sin límite. [1]

No hay contradicción porque las dos medidas siguen secuencias diferentes. Un aumento no acotado de una no obliga a un aumento no acotado de la otra. La construcción aporta un contraejemplo a esa intuición en vez de apoyarse en una imagen que simplemente parece complicada.

El objeto infinito es el límite matemático, no uno de los dibujos finitos. Un instrumento que mide un borde físico tiene una escala mínima utilizable, y el material real no tiene por qué seguir la construcción a distancias arbitrariamente pequeñas. El resultado no debe convertirse en una afirmación de que una costa continúa sin cambios más allá de cualquier resolución posible.

Una figura puede, por tanto, tener área finita y perímetro infinito en el sentido matemático indicado. La clave es la relación entre los tamaños de las adiciones sucesivas y el detalle añadido al borde. El cálculo del límite establece la afirmación; una semejanza física aproximada no lo hace.

Notas técnicas (opcionales)

Una regla que puede repetirse

Empecemos con un triángulo equilátero de lado s . Sustituyamos cada lado por cuatro segmentos, cada uno de longitud igual a un tercio del original: conservamos el primer y el último tercio y sustituimos el tercio central por los otros dos lados de un triángulo equilátero que apunta hacia fuera. Aplicamos la misma operación a cada segmento nuevo. [1]

En la etapa cero, el borde tiene tres lados. En la etapa uno tiene doce; en la etapa dos tiene cuarenta y ocho. En general, hay 3×4^n segmentos en la etapa n , y cada segmento tiene longitud $s/3^n$. Por tanto, su longitud total es $P(n) = 3s(4/3)^n$. Esta expresión se deduce de la regla indicada; no es un ajuste empírico.

Cada etapa multiplica el perímetro por $4/3$. Los segmentos individuales se acortan, pero su número crece más deprisa. Para cualquier límite superior finito que se proponga para el perímetro, continuar la construcción lo suficiente produce un polígono con un

perímetro mayor. Cada polígono finito sigue teniendo longitud finita. El crecimiento sin cota se refiere a la sucesión, y el borde límite no es ninguno de esos polígonos.

Adónde va el área adicional

Sea A el área del triángulo original. En el primer paso añadimos tres triángulos de lado $s/3$. Las áreas varían como el cuadrado de una dimensión lineal, por lo que cada triángulo pequeño tiene área $A/9$. La primera adición es $A/3$.

En el segundo paso se añaden doce triángulos aún más pequeños. Cada uno tiene área $A/81$, lo que da una adición total de $4A/27$. La siguiente adición es $16A/243$. Cada total de área añadida es $4/9$ del anterior. A diferencia de $4/3$, esta razón es menor que uno.

El área total tras n pasos es $A(n) = A + (A/3)[1 + 4/9 + \dots + (4/9)^{(n-1)}]$. La expresión entre corchetes es una suma geométrica finita. Al tomar su límite se obtiene $A(\text{infinity}) = A + (A/3)/(1 - 4/9) = 8A/5$. Esto coincide con el cálculo habitual del copo de nieve. [1]

Para dar una escala concreta, si el triángulo inicial tiene un área de 100 unidades cuadradas, el área límite es de 160 unidades cuadradas. Tras dos pasos, el área es de unas 148,15 unidades cuadradas. El perímetro ya ha crecido por un factor de $16/9$ y puede seguir creciendo sin cota. Estos números describen solo la construcción ideal.

Por qué el límite es una afirmación matemática real

Una instrucción interminable no justifica por sí sola todas las propiedades que podamos atribuir a su resultado. Necesitamos especificar qué converge. Aquí, los rasgos añadidos ocupan escalas espaciales progresivamente menores. Sus desplazamientos máximos forman una serie geométrica convergente, de modo que los contornos sucesivos se acercan a una curva límite continua y definida.

Las longitudes poligonales crecientes también corresponden a verdaderas cotas inferiores de la longitud de esa curva. La construcción conserva los vértices de las etapas anteriores. Conectar una selección finita ordenada de puntos del borde límite produce una aproximación poligonal. La longitud de una curva se define tomando el supremo de esas sumas finitas de distancias. Puesto que los vértices conservados de la etapa n ya dan $P(n)$, y $P(n)$ no está acotado, la curva no puede tener longitud finita.

Este argumento importa. En general, figuras que convergen no tienen por qué tener perímetros que converjan al perímetro de la figura que creemos ver. Aquí, la conclusión sobre la longitud se sigue de los vértices conservados y de la definición de longitud, no solo de una impresión de rugosidad creciente.

El área se comporta de forma diferente porque cada nueva contribución disminuye geoméricamente. El área finita y la longitud infinita del borde son propiedades compatibles bajo sus respectivas definiciones. Ninguno de los cálculos anula el otro.

Referencias

[1] American Mathematical Society, Graduate Student Blog. "Koch Snowflake." 21 de diciembre de 2013. <https://blogs.ams.org/mathgradblog/2013/12/21/koch-snowflake/>

¿Por qué añadir una carretera puede empeorar el tráfico?

Una carretera adicional añade una opción, pero puede hacer más lentos los viajes elegidos de forma independiente. Las carreteras anteriores no tienen por qué desaparecer. Lo que cambia es cómo se distribuyen las personas por la red. La paradoja de Braess distingue la mejor asignación posible del equilibrio producido por las elecciones individuales de ruta. [1]

Consideremos la red ilustrativa estándar desarrollada en las notas. Cuatro mil viajeros se reparten inicialmente entre dos rutas. Cada ruta combina un tramo cuyo tiempo de viaje aumenta con el uso y un tramo que requiere cuarenta y cinco minutos. Con el reparto igualitario, cada viaje dura sesenta y cinco minutos. Son tiempos de un modelo, no mediciones de una ciudad.

Una nueva conexión parece atractiva al principio porque une los dos tramos de tiempo variable. Pero su ventaja aparente se calcula con la congestión anterior. A medida que los viajeros la utilizan, ambos tramos se congestionan más. En el nuevo equilibrio, la ruta conectada requiere ochenta minutos, mientras que un viajero que cambiara por su cuenta a cualquiera de las rutas anteriores tardaría ochenta y cinco.

Todos podrían restablecer colectivamente el reparto anterior, pero esa asignación daría a un individuo un motivo para volver a tomar el atajo. La asignación anterior deja de ser estable bajo la regla de elección especificada. No hace falta que los viajeros cometan errores aritméticos: cada uno compara sus tiempos personales de viaje dado lo que hacen los demás.

El mecanismo no demuestra que una carretera nueva concreta haya causado retrasos observados. También pueden cambiar la demanda, otros cierres, los semáforos y la adaptación. Una comprobación real necesita flujos por ruta, tiempos de viaje y una comparación creíble que aborde esas alternativas. El modelo mantiene fija la demanda, por lo que su efecto es distinto de un aumento del número de viajes.

Más opciones no pueden empeorar la mejor asignación posible si un coordinador puede ignorarlas. Pero la elección individual no alcanza automáticamente esa asignación óptima. El valor de una carretera depende, por tanto, de cómo modifica la conducta y los costes compartidos, no solo del número de conexiones del mapa.

Notas técnicas (opcionales)

Una red que podemos calcular

Consideremos un ejemplo ilustrativo estándar con 4 000 viajeros que realizan el mismo trayecto durante un período modelizado. Hay dos rutas de un origen O a un destino D. La ruta superior pasa por A; la inferior pasa por B. Al principio no hay carretera entre A y B.

En la carretera O-A, el tiempo de viaje en minutos es el número x de viajeros que la usan dividido por 100. En la carretera B-D se aplica la misma regla a su propio flujo. Las otras dos carreteras, A-D y O-B, requieren 45 minutos cada una con independencia del flujo. Es un modelo estático deliberadamente simplificado. No es un sistema viario medido ni una descripción de colas que se forman minuto a minuto.

Si 2 000 viajeros toman cada ruta, el tramo de tiempo variable requiere 20 minutos y el de tiempo fijo, 45. Por tanto, cada ruta requiere 65 minutos. Si muchos más viajeros toman la ruta superior, esa ruta se vuelve más lenta y la inferior se hace más atractiva. El reparto igualitario es el equilibrio en el modelo en que cada viajero tiene una influencia despreciable sobre el flujo total.

Aquí, equilibrio significa que ningún viajero puede acortar el trayecto eligiendo unilateralmente otra ruta disponible mientras las elecciones de todos los demás permanecen fijas. No significa que la red haya alcanzado todos los objetivos sociales posibles ni que las personas reales descubran el equilibrio instantáneamente.

Añadamos una conexión muy atractiva

Añadamos ahora una conexión unidireccional A-B con tiempo de viaje cero. Cero es una idealización elegida para hacer transparente la aritmética. No cambia ninguna otra carretera ni función de tiempo de viaje, y la demanda total sigue siendo de 4 000.

Con el reparto original, un viajero puede ver una ruta atractiva O-A-B-D: aproximadamente $20 + 0 + 20 = 40$ minutos. Parece mucho mejor que 65. Pero el cálculo usa la congestión anterior mientras contempla un nuevo patrón colectivo. No puede seguir siendo correcto si todos responden del mismo modo.

En el nuevo equilibrio, los 4 000 viajeros toman la ruta que usa la conexión. Los tramos O-A y B-D requieren 40 minutos cada uno, de modo que el total es de 80 minutos. Un individuo que cambie a la antigua ruta superior tardaría $40 + 45 = 85$ minutos; la antigua ruta inferior requeriría $45 + 40 = 85$. Ningún individuo gana abandonando la nueva ruta.

Así, el modelo ha pasado de 65 minutos por viajero a 80, un empeoramiento de 15 minutos. Todas las opciones antiguas siguen físicamente disponibles. Lo que desapareció fue el antiguo patrón de uso, no las carreteras antiguas. Este cálculo ilustra el mecanismo identificado por Braess. [1] Los números utilizados aquí forman un ejemplo ilustrativo estándar.

Por qué no pueden todos elegir simplemente la solución anterior

Podrían hacerlo si sus elecciones se coordinaran y se mantuvieran. Pero con el reparto igualitario por las rutas antiguas, un individuo puede tomar el nuevo atajo y ganar. Esa desviación ventajosa vuelve inestable la asignación anterior bajo la regla de elección individual especificada.

El problema es el coste que un viajero impone a los demás al incorporarse a un tramo susceptible de congestión. Cada viajero compara tiempos de viaje personales. La comparación no incluye automáticamente el retraso adicional impuesto a todos los demás viajeros que comparten una carretera. Por tanto, el movimiento individualmente atractivo y la asignación colectivamente deseable son problemas de optimización diferentes.

El modelo no acusa a los viajeros de cometer errores aritméticos. En el nuevo equilibrio, la ruta que cada uno elige es una mejor respuesta a las rutas que usan los demás. La información perfecta sobre los tiempos de viaje modelizados no haría por sí sola que el antiguo reparto igualitario fuera un equilibrio.

Un coordinador podría prohibir el atajo o usar un sistema adecuado de incentivos para cambiar las opciones disponibles o sus costes. Esa afirmación identifica una posibilidad dentro del modelo. No es una recomendación de cerrar una carretera real sin considerar la demanda, el acceso, la seguridad, los efectos distributivos y los medios de transporte alternativos.

Referencias

[1] Braess, D., Nagurney, A., and Wakolbinger, T. "On a Paradox of Traffic Planning." *Transportation Science* 39(4), 446–450 (2005). Traducción inglesa del artículo de Braess de 1968.
<https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0127>

¿Cómo puede ser erróneo un resultado positivo?

Un resultado positivo puede proceder de dos grupos: objetos que tienen la condición y objetos que no la tienen. Para interpretarlo, debemos contar ambas vías de entrada al grupo de positivos. Una tasa alta de detección entre los objetos afectados no responde a cuántos resultados positivos son correctos.

Tomemos un ejemplo inventado de diez mil objetos, de los que cien son defectuosos según un procedimiento de referencia que se supone correcto. Una prueba detecta noventa de esos defectos. También marca incorrectamente como positivo al cinco por ciento del grupo no defectuoso, mucho mayor, y produce cuatrocientos noventa y cinco falsos positivos.

Hay, por tanto, quinientos ochenta y cinco resultados positivos, de los cuales solo noventa están asociados al defecto. Eso es aproximadamente el quince por ciento. La tasa de detección no ha cambiado; ha cambiado el denominador. «Se detecta la mayoría de los objetos defectuosos» y «la mayoría de los objetos positivos son defectuosos» son afirmaciones distintas.

Las notas exploran cambios en la prevalencia y la especificidad, y después examinan una segunda prueba. La repetición ayuda en ese modelo solo bajo supuestos explícitos sobre la dependencia entre errores. Si la misma interferencia produce ambos resultados, multiplicar las probabilidades de error puede exagerar lo que añade repetir la prueba.

Las frecuencias naturales mantienen visibles estos grupos, y la investigación ha examinado su uso en tareas de razonamiento. Sin embargo, la aritmética de este ejemplo está estipulada, no medida. Las características reales de una prueba y la prevalencia deben estimarse, con incertidumbre y atendiendo a la población a la que se aplican. [1]

Esta no es una prueba clínica ni un consejo diagnóstico. Es una forma de revelar un error de inferencia condicional. Antes de interpretar un resultado positivo, pregunta de qué población procede, qué proceso alternativo podría producirlo y qué denominador utiliza realmente el porcentaje citado.

Notas técnicas (opcionales)

Empecemos por la población, no por el resultado

Imaginemos 10 000 objetos que se examinan para detectar un defecto especificado. Un procedimiento de referencia independiente establece que 100 son defectuosos y 9 900 no lo son. Por tanto, la prevalencia del defecto es del 1% en esta población. Supongamos para este ejercicio que la clasificación de referencia es correcta.

Supongamos ahora que la prueba de cribado tiene una sensibilidad del 90%: da positivo en 90 de los 100 objetos defectuosos. No detecta los otros 10. Supongamos que su especificidad es del 95%: da negativo en 9 405 de los 9 900 objetos no defectuosos. Los 495 objetos no defectuosos restantes dan resultados positivos.

No hemos afirmado que el 90% o el 95% de los resultados positivos sean correctos. Esos porcentajes tienen denominadores diferentes. La sensibilidad parte de los objetos defectuosos; la especificidad parte de los no defectuosos. La pregunta que plantea un resultado positivo parte de los objetos que dieron positivo.

Cambiamos el denominador

Hay $90 + 495 = 585$ resultados positivos. Solo 90 corresponden al defecto. Por tanto, el valor predictivo positivo en esta población hipotética es $90/585$, aproximadamente el 15,38%.

Los 495 falsos positivos no constituyen evidencia de fraude ni de que la prueba no sirva para nada. Surgen de la tasa supuesta de falsos positivos del 5% aplicada a un grupo no defectuoso muy grande. Los 90 verdaderos positivos proceden de una tasa alta de detección aplicada a un grupo defectuoso mucho menor. Ambos recuentos deben entrar en el cálculo.

Esta es la trampa conceptual: «la prueba detecta el 90% de los defectos» responde a una pregunta sobre objetos que se sabe que son defectuosos. No responde a «dado un resultado positivo, ¿qué proporción de objetos son defectuosos?». Invertir el condicionamiento cambia la pregunta, aunque ambas frases contengan las mismas palabras: positivo y defectuoso.

El cálculo es exacto para los recuentos estipulados. En un estudio real, la sensibilidad, la especificidad y la prevalencia se estimarían, con incertidumbre y posible sesgo. Los enteros sencillos de aquí no deben confundirse con ese grado de certeza empírica.

Cambiamos un supuesto cada vez

Mantengamos fijas la sensibilidad y la especificidad de la prueba, pero dejemos que la prevalencia aumente al 10%. Entre 10 000 objetos, 1 000 son ahora defectuosos y 9 000 no lo son. Esperamos 900 verdaderos positivos y 450 falsos positivos, de modo que el valor predictivo positivo pasa a ser $900/1\,350$, aproximadamente el 66,67%.

Nada ha mejorado en la prueba supuesta. Lo que cambió fue la composición de la población examinada. Un resultado interpretado en una población no puede heredar sin más el valor predictivo medido en otra. Mantener constantes las características de la prueba es, en sí mismo, un supuesto de modelización; en la práctica, esas características también pueden diferir entre poblaciones y condiciones de funcionamiento.

Volvamos a una prevalencia del 1%, pero aumentemos ahora la especificidad al 99%, manteniendo la sensibilidad en el 90%. Sigue habiendo 90 verdaderos positivos, pero ahora solo 99 falsos positivos. El valor predictivo positivo pasa a ser $90/189$, aproximadamente el 47,62%. Esta mejora sustancial sigue sin hacer seguro un resultado positivo.

Estas dos variaciones separan dos factores sobre los que actuar: cambiar a quién examinamos y cambiar la tasa de falsos positivos. No son intervenciones intercambiables, y ninguno de los cálculos nos dice qué umbral de funcionamiento o política de pruebas es adecuado para una aplicación real.

Por qué repetir la prueba no es automáticamente una solución

Supongamos que una segunda prueba tiene las mismas tasas y que, condicionado al estado verdadero, sus errores son independientes de los de la primera prueba. Con prevalencia del 1%, el número esperado de objetos defectuosos positivos en ambas es $100 \times 0,9 \times 0,9 = 81$. El número esperado de objetos no defectuosos positivos en ambas es $9\,900 \times 0,05 \times 0,05 = 24,75$. La proporción correspondiente es $81/105,75$, aproximadamente el 76,60%.

El número no entero 24,75 es un recuento esperado a lo largo de repeticiones del proceso hipotético de muestreo, no una fracción de un objeto físico. Más importante aún, la independencia desempeña un papel crucial. Si la misma interferencia hace que ambas pruebas sean positivas, multiplicar las tasas de error puede exagerar mucho el beneficio de repetirlas.

En el extremo opuesto, si la segunda prueba simplemente reproduce todos los resultados de la primera, dos positivos no contienen más información que uno. El cálculo sigue siendo 90/585. Los procedimientos reales de seguimiento requieren evidencia sobre la dependencia, el manejo de las muestras y el estándar de referencia; la repetición por sí sola no proporciona esa evidencia.

Referencias

[1] Hoffrage, U., Krauss, S., Martignon, L., and Gigerenzer, G. "Natural frequencies improve Bayesian reasoning in simple and complex inference tasks." *Frontiers in Psychology* 6, 1473 (2015).
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01473>

¿Qué puede revelar el alivio del dolor sobre la experiencia de un pulpo?

Un pulpo no puede decirnos con palabras si el alivio le resulta gratificante. Eso no vuelve poco informativa su conducta, pero cambia la inferencia necesaria. La pregunta útil es si una intervención modifica la preferencia de una manera que depende de una condición aversiva previa, en comparación con controles adecuados.

Primero hay que distinguir el dolor de la nocicepción. La nocicepción concierne al procesamiento neuronal de estímulos nocivos; el dolor incluye una experiencia sensorial y emocional desagradable. La actividad neuronal por sí sola no establece dolor, mientras que la incapacidad de comunicarse verbalmente no lo excluye. [2]

Crook estudió *Octopus bocki* mediante preferencias de lugar. Los animales tratados con ácido acético diluido en un brazo evitaron después un compartimento asociado a esa condición, a diferencia de los controles con solución salina. En comparaciones separadas, la lidocaína local aumentó la preferencia por un compartimento asociado, antes menos preferido, después del tratamiento con ácido, pero no después de la solución salina. Animales distintos participaron en las cuatro condiciones. [1]

Los animales también mostraron acicalamiento dirigido a la herida. Los registros encontraron actividad sostenida tras el ácido y supresión tras la lidocaína, pero utilizaron una preparación reducida sin sistema nervioso central. Midieron señales entrantes, no registraron directamente una experiencia en un cerebro intacto. El artículo también describió variabilidad e incertidumbre al conectar la preferencia con estados subjetivos. [1]

La comparación importa más que el nombre del fármaco. Una intervención que se vuelve gratificante solo en una condición aversiva puede estar proporcionando alivio. Trabajos relacionados sobre preferencia de lugar en ratas aportan un precedente metodológico, no una demostración independiente sobre pulpos. Las notas utilizan valores inventados para mostrar qué puede establecer numéricamente un contraste de preferencias. [3]

En conjunto, los hallazgos respaldan la inferencia de un estado aversivo persistente y una interpretación que implica dolor afectivo. No dan acceso directo a lo que siente el animal ni establecen el mismo resultado para todos los cefalópodos. Su fuerza reside en varias observaciones acotadas que encajan con la hipótesis del alivio, mientras que la distancia entre observación y experiencia permanece explícita. [1]

Notas técnicas (opcionales)

Un ejemplo resuelto de lo que puede y no puede decir una puntuación de preferencia

Imaginemos dos grupos hipotéticos examinados durante diez minutos antes y después del condicionamiento. En el grupo con la condición adversa, el tiempo medio en un compartimento designado aumenta de dos minutos a cinco. En el grupo de control, aumenta de tres minutos a cuatro. Son valores didácticos inventados, no mediciones del estudio de Crook.

El cambio del primer grupo es de más tres minutos; el del control es de más uno. Restar los cambios da un contraste de dos minutos. En puntos porcentuales de la prueba de

diez minutos, los cambios son de más 30 y más 10, lo que da un contraste de 20 puntos. Comparar los cambios evita que la diferencia inicial entre grupos pase inadvertidamente a formar parte del efecto aparente.

Esa aritmética no establece por sí sola un efecto fiable del tratamiento. Las medias podrían ocultar animales individuales que cambian en direcciones opuestas. Una diferencia podría estimarse con muy poca precisión. La interpretación también depende de cómo se asignaron los animales, de si las condiciones eran comparables en los demás aspectos y de si todos podían explorar el aparato. Son preguntas sobre el diseño y los datos, no correcciones que la resta proporcione automáticamente.

Tampoco el contraste es una escala de dolor. El doble de tiempo en un compartimento no significa el doble de sufrimiento previo. La magnitud medida es la distribución del tiempo bajo condiciones concretas. Traducirla a una intensidad de experiencia requeriría una relación entre ambas justificada por separado.

Referencias

- [1] Crook, R. J. Behavioral and neurophysiological evidence suggests affective pain experience in octopus. *iScience* 24(3), 102229 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102229>
- [2] International Association for the Study of Pain. Terminology: Pain and Nociception. Consulta: 7 de octubre de 2026. <https://www.iasp-pain.org/resources/terminology/>
- [3] King, T., et al. Unmasking the tonic-aversive state in neuropathic pain. *Nature Neuroscience* 12, 1364-1366 (2009). <https://doi.org/10.1038/nn.2407>