

Propiedades de la función de costo epistémico-evolutiva

Inteligencia de la vida

$$p=\mathfrak{b}$$

Laboratorios de Métodos Bayesianos

Resumen

Los procesos evolutivos de selección de las formas de vida, por secuencia de tasas de supervivencia y reproducción, son como los procesos de selección de las hipótesis en la teoría de la probabilidad, por secuencias de predicciones, de naturaleza multiplicativa. Debido a que en ellos los impactos de las pérdidas son más fuertes que los de las ganancias (un cero en la secuencia produce una extinción irreversible), las variantes que florecen son hipótesis o formas de vida que reducen las fluctuaciones por diversificación individual (*propiedad epistémica*), por cooperación (*propiedad evolutiva*), por especialización cooperativa (*propiedad de especiación*), y por heterogeneidad cooperativa (*propiedad ecológica*). Durante mucho tiempo se creyó que la evolución de la cooperación estaba condicionada por un dilema. No existe tal dilema debido a que en los procesos de selección multiplicativos, los individuos desertores aumentan las fluctuaciones de los cooperadores de quienes dependen, aumentando por lo tanto sus propias fluctuaciones y afectando negativamente su propia tasa de crecimiento de largo plazo (*propiedad mayor*). Si bien ciertas coyunturas pueden favorecer a la desertión en el corto plazo (*propiedad menor*), la emergencia de unidades cooperativas de nivel superior es un fenómeno permanente en la historia de la vida (transiciones evolutivas mayores). La evidencia es nuestra propia vida, que depende de al menos cuatro de estos niveles para sobrevivir: la célula con la mitocondria, el organismo multicelular, el sistema social y la comunidad ecológica. Además, en probabilidad ocurre algo similar: conjunto de hipótesis individuales forman variables, relaciones entre variables forman modelos causales y varios modelos forman teorías. En la historia del ser humano, la transición cultural tuvo efectos positivos evidentes: antes de la cooperación epistémica (transmisión del conocimiento) estuvimos en grave peligro de extinción; luego fuimos capaces de ocupar todos los nichos ecológicos de la tierra como ningún otro vertebrado terrestre. En la historia reciente, ciertas coyunturas produjeron la emergencia del colonialismo, una era de genocidios y masiva pérdida de diversidad cultural. A pesar de todos los avances, la ciencia metropolitana no fue capaz de compensar la pérdida de los conocimientos milenarios, y la crisis ecológica actual no deja de profundizarse. A largo plazo solo sobreviven las variantes capaces de reducir las fluctuaciones por diversificación individual y por especialización heterogénea cooperativa.

1. La función de costo epistémico-evolutiva

La ciencia es una institución humana que tiene pretensión de verdad: de alcanzar acuerdos intersubjetivos con validez intercultural, universal. Las ciencias formales (matemática, lógica) alcanzan estos acuerdos derivando teoremas dentro de sistemas axiomáticos cerrados. Sin embargo, las ciencias empíricas (desde la física hasta las ciencias sociales) deben validar sus proposiciones en sistemas abiertos que contienen siempre algún grado de incertidumbre. ¿Es posible entonces alcanzar acuerdos intersubjetivos (“verdades”) en las ciencias empíricas si es inevitable decir “no sé”? Sí. En pocas palabras, podemos evitar mentir: no decir más de lo que se sabe, incorporando al mismo tiempo toda la información disponible.

Por ejemplo, supongamos que sabemos que hay un regalo escondido detrás de una caja entre tres. ¿Dónde está el regalo? Si elegimos alguna de las cajas estaríamos afirmando más de lo que sabemos, porque no tenemos información que nos haga preferir ninguna de ellas. En este caso, vamos a estar de acuerdo en la necesidad de dividir la creencia en partes iguales. Maximizando la incertidumbre evitamos decir más de lo que sabemos, permitiéndonos alcanzar un primer acuerdo intersubjetivo en contextos de incertidumbre! Bien. ¿Pero ahora, cómo preservamos el acuerdo intersubjetivo en casos más complejos, cuando recibimos nueva información?

La lógica de la incertidumbre (teoría de la probabilidad) ha sido derivada repetidas veces a partir de diversos principios (axiomas), llegando siempre a las mismas dos simples reglas. La *regla de la suma* garantiza no perder creencia cuando la distribuimos entre hipótesis mutuamente contradictorias: al sumar



Figura 1. Dos distribución de creencias. Maximizar incertidumbre permite alcanzar un primer acuerdo intersubjetivo.

cuánto le hemos asignado a cada hipótesis, recuperamos el 100 % inicial.

Regla de la suma:

$$P(A) + P(\text{no } A) = 1$$

Y la *regla del producto* (o condicional), garantiza la coherencia de las creencias con la información disponible: preservamos la creencia previa que sigue siendo compatible con los nuevos datos (y la creencia que sobrevive la consideramos nuestro nuevo 100 %).

Regla del producto:

$$\underbrace{P(\text{Hipótesis}|\text{Dato})}_{\substack{\text{Creencia condicional} \\ \text{Nueva creencia}}} = \underbrace{P(\text{Hipótesis}, \text{Dato})}_{\substack{\text{Creencia previa conjunta} \\ \text{compatible con el dato}}} / \underbrace{P(\text{Dato})}_{\substack{\text{Predicción del dato} \\ \text{creencia compatible total}}}$$

Estas son las reglas de la probabilidad para actualizar las creencias en contextos de incertidumbre. No hay más. Por ejemplo, supongamos que ahora nos dejan elegir una de las cajas y luego alguien nos da una pista, abriendo una caja distinta a la que elegimos en la que no está el regalo (figura 2). Con esta información previa podemos definir un modelo causal sobre la pista (figura 2a). Antes de actualizar la creencia sobre la posición del regalo con la información de la pista, necesitamos la creencia inicial que surge de maximizar la incertidumbre, dividiendo la creencia en partes iguales por los caminos alternativos del modelo causal (figura 2b). Y finalmente, la nueva creencia surge de preservar la creencia inicial que sigue siendo compatible con el dato (figura 2c).

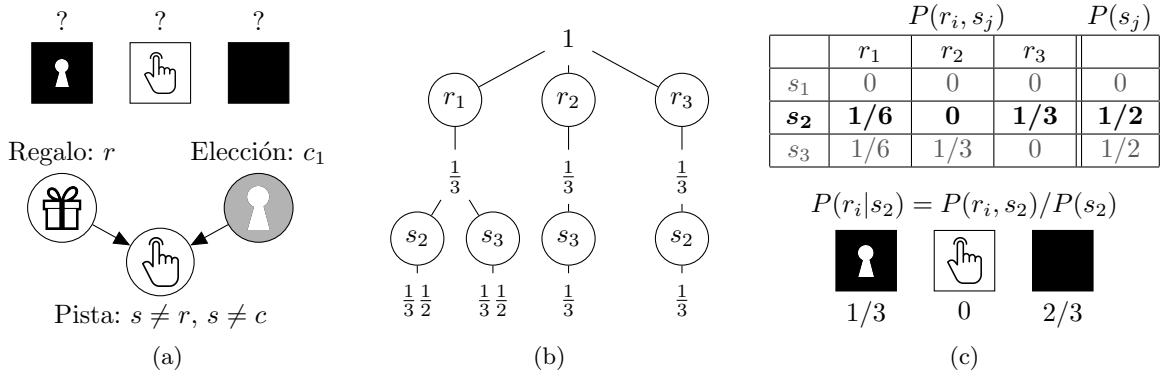


Figura 2. Acuerdo intersubjetivo dada toda la información disponible (modelo causal y datos). (a) El modelo causal asegura que la pista s no puede señalar la caja elegida c (con la cerradura) ni la caja donde se encuentra el regalo r (la hipótesis oculta): $s \neq c$ y $s \neq r$. (b) Calculamos la creencia que maximiza la incertidumbre dado el modelo causal dividiendo la creencia en partes iguales en cada bifurcación de los universos paralelos. (c) La nueva creencia no es más que la creencia inicial (tabla) que sigue siendo compatible con el dato s_2 (renglón oscuro), expresada como 100 %

A diferencia de los enfoques ad-hoc que seleccionan una única hipótesis (e.g. por máxima verosimilitud), la aplicación estricta de las reglas de la probabilidad (enfoque bayesiano), considerando al mismo tiempo hipótesis mutuamente contradictorias (A y no A), permite que sea la sorpresa, única fuente de

información, el filtro de las creencias previas. En general, si tenemos $\text{Datos} = \{\text{dato}_1, \text{dato}_2, \dots\}$,

$$\underbrace{P(\text{Hipótesis}, \text{Datos})}_{\text{Creencia compatible con los datos}} = \underbrace{P(\text{Hipótesis})}_{\text{Acuerdo intersubjetivo inicial}} \underbrace{P(\text{data}_1 | \text{Hipótesis})}_{\text{Predicción 1}} \underbrace{P(\text{data}_2 | \text{data}_1, \text{Hipótesis})}_{\text{Predicción 2}} \dots$$

Si la predicción del dato observado es 1 (sorpresa nula), entonces preservamos toda nuestra creencia previa en esa hipótesis. Si la predicción del dato observado es 0 (sorpresa total), entonces la hipótesis se hace falsa para siempre.

Así como en probabilidad la evaluación de las hipótesis es por secuencias de predicciones, en evolución la selección de las formas de vida también es de naturaleza multiplicativa, por secuencia de tasas de supervivencia y reproducción. De hecho, el modelo estándar de evolución, conocido como *replicator dynamic* [1], es estructuralmente equivalente al teorema de Bayes, lo que llevó a autores reconocidos en ambas áreas a proponer el isomorfismo entre las teorías de la evolución y la inferencia bayesiana [2, 3].

$$\underbrace{P\left(\begin{array}{c} \text{Hipótesis o} \\ \text{Forma de vida} \end{array} \middle| \text{Datos}, \begin{array}{c} \text{Modelo} \\ \text{Causal} \end{array}\right)}_{\text{Nueva proporción de la variante}} = \frac{\overbrace{P\left(\begin{array}{c} \text{Datos}, \\ \text{Forma de vida} \end{array} \middle| \begin{array}{c} \text{Hipótesis o} \\ \text{Modelo} \end{array}\right)}^{\text{Adaptabilidad de la variante a la realidad}} \overbrace{P\left(\begin{array}{c} \text{Hipótesis o} \\ \text{Forma de vida} \end{array} \middle| \begin{array}{c} \text{Modelo} \\ \text{Causal} \end{array}\right)}^{\text{Vieja proporción de la variante}}}{\underbrace{P\left(\begin{array}{c} \text{Datos}, \\ \text{Causal} \end{array}\right)}_{\text{Proporción sobreviviente}}}$$

Como veremos en la siguiente sección, debido a que en los procesos multiplicativos los impactos de las pérdidas son más fuertes que los de las ganancias (por ejemplo, un único cero en la secuencia produce una extinción irreversible) existe una ventaja a favor de las variantes (hipótesis o formas de vida) que reducen las fluctuaciones por diversificación (propiedad epistémica), cooperación (propiedad evolutiva), especialización cooperativa (propiedad de especiación) y heterogeneidad cooperativa (propiedad ecológica). Estas propiedades de los procesos de selección multiplicativo han producido a lo largo de la historia de la vida una serie de transiciones evolutivas en las que entidades capaces de autorreplicación, luego de la transición, pasaron a formar parte de unidades cooperativas indisolubles [4, 5, 6].

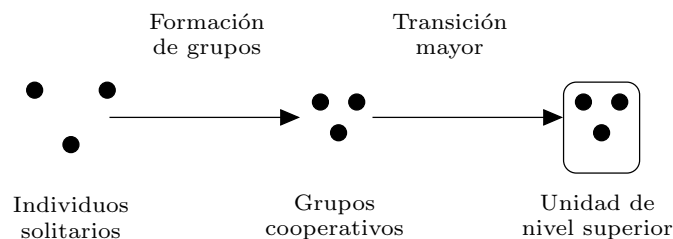


Figura 3. Esquema de las transiciones evolutivas mayores

Nuestra propia vida depende de varios niveles de cooperación con especialización heterogénea, sin los cuales no somos capaces de sobrevivir: la unión de nuestras células con las mitocondrias y la emergencia de las organelas; nuestro organismo multicelular y la emergencia de los órganos; nuestra sociedad y la emergencia de los roles y grupos; la coexistencia entre especies y la emergencia de los ecosistemas.

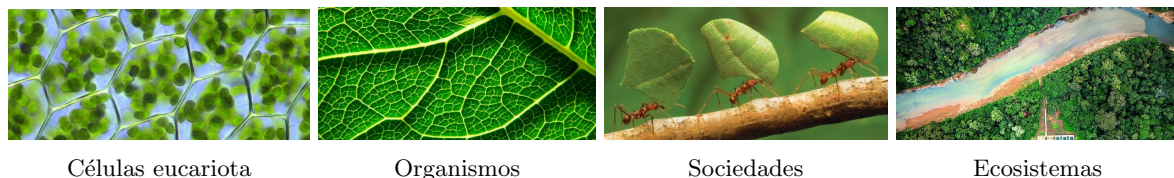


Figura 4. Ejemplos de transiciones evolutivas mayores. La emergencia de unidades de nivel superior es un fenómeno permanente en la historia de la vida.

De forma similar, en la teoría de la probabilidad también emergen unidades cooperativas de nivel superior: las hipótesis individuales forman variables, las variables forman modelos causales y los conjuntos

de modelos forman teorías. Esto ocurre gracias a que las hipótesis de nivel superior reducen las fluctuaciones realizando las predicciones con el aporte de todas las hipótesis de nivel inferior que la componen. Por la regla de la suma, la predicción que hace un modelo del próximo dato es

$$P(d_{n+1}|d_1 \dots d_n, \text{Modelo}) = \sum_h^{\text{Hipótesis}} P(d_{n+1}|d_1 \dots d_n, h, \text{Modelo}) P(h|d_1 \dots d_n, \text{Modelo})$$

De esta forma, al realizar la predicción con la contribución de todas las hipótesis de nivel inferior, los modelos reducen las posibilidades de introducir valores extremos (un cero) en los procesos de selección multiplicativo a los que están sujetos, produciendo mejores resultados que los que se obtendrían con cualquiera de ellas individualmente.

2. Propiedades de la función de costo epistémico-evolutiva

Desde su origen, la vida adquirió una extraordinaria complejidad en términos de diversificación, cooperación, especialización y heterogeneidad. Para ver por qué, veamos qué ocurre con un proceso multiplicativo. Por ejemplo, supongamos que una casa de apuestas ofrece pagos $Q_c > 0$ y $Q_s > 0$ cuando una moneda sale Cara y Seca respectivamente y que los individuos se ven obligados a apostar en cada paso temporal todos sus recursos, asignando una proporción $b_c = b$ a Cara y $b_s = 1 - b$ a Seca (apostar solo un parte de los recursos puede mostrarse que tiene una solución equivalente). Si nuestros recursos iniciales son ω_0 , los recursos que obtenemos con una apuestas $b \in [0, 1]$ después de una Cara y una Seca es el producto de nuestros resultados.

$$\omega_2(b) = \underbrace{\omega_0}_{\omega_1(b)} \overbrace{b Q_c}^{\text{Cara}} \overbrace{(1-b) Q_s}^{\text{Seca}}$$

Las apuestas son entonces procesos multiplicativos. Vamos a buscar las estrategias que maximizan la tasa de crecimiento de los recursos.

Propiedad epistémica. Si comparamos los recursos de dos apuestas diferentes $b \neq d \in [0, 1]$ luego de obtener n_c Caras y n_s Secas, en el tiempo $T = n_c + n_s$,

$$\frac{\omega_T(b)}{\omega_T(d)} = \frac{\omega_0 (b Q_c)^{n_c} ((1-b) Q_s)^{n_s}}{\omega_0 (d Q_c)^{n_c} ((1-d) Q_s)^{n_s}} \quad (1)$$

encontramos que el valor relativo de una apuesta respecto de la otra es independiente de los pagos Q_c y Q_s que ofrece la casa de apuestas! Sí, lo que estamos diciendo es que podemos decidir la apuesta sin conocer los pagos. En general, queremos la apuesta b que maximiza la tasa de crecimiento $r(b)$,

$$\begin{aligned} \omega_0 r(b)^T &= \omega_0 (b Q_c)^{n_c} ((1-b) Q_s)^{n_s} \\ r(b) &= (b Q_c)^{n_c/T} ((1-b) Q_s)^{n_s/T} \end{aligned} \quad \begin{array}{c} \text{Apuesta} \\ \text{óptima} \\ \arg \max_b r(b) \end{array} = \begin{array}{c} \text{Frecuencia} \\ \text{observada} \\ n_c/T \end{array} \quad (2)$$

En efecto, no importa los pagos que ofrezca la casa de apuestas, la apuesta óptima b^* es la que divide los recursos en la misma proporción que la frecuencia observada, $b^* = n_c/T$, la que en el largo plazo tiende a la frecuencia típica $\lim_{T \rightarrow \infty} n_c/T = p$. Ésta es la *propiedad epistémica* que le permite a la teoría de la probabilidad adquirir conocimiento sobre el mundo, pues al evaluar las hipótesis individuales en base al producto de las sorpresas se produce una ventaja a favor de las hipótesis que diversifican la predicción en la misma proporción que la frecuencia observada. Del mismo modo, el proceso de selección evolutiva por secuencias de tasas de crecimiento y reproducción, produce la emergencia de formas de vida que reducen las fluctuaciones a través de la diversificación individual.

Por ejemplo, supongamos que la casa de apuestas ofrece $Q_c = 3$ por Caras y $Q_s = 1,2$ por Secas. Si sabemos que la moneda es no sesgada, lo mejor que podemos hacer a largo plazo es dividir los recursos en partes iguales, $b = p = 0,5$. En este caso, sin embargo, no podemos ganar este juego individualmente

debido a que las ganancias de 50 % con Caras ($1,5 = Q_c b$) no alcanza para compensar las caídas de 40 % que sufrimos con Secas ($0,6 = Q_s (1 - b)$). Incluso con el comportamiento óptimo, individualmente las trayectorias de los recursos caen a una tasa cercana a 5 %, pues $r(b) \approx 0,95$ (figura 6).

Propiedad evolutiva. A pesar de que la diversificación individual no es suficiente para ganar este juego, la vida encontró estrategias para florecer en casos como estos, reduciendo aun más las fluctuaciones individuales mediante cooperación [7, 8]. Por ejemplo, si los individuos de un grupo de tamaño N redistribuyen los recursos en partes iguales luego de apostar, la riqueza de cada uno pasa a ser el promedio de todos los recursos luego de que m_c y m_s individuos obtienen Cara y Seca respectivamente, con $m_c + m_s = N$.

$$\begin{aligned} \omega_{T+1}(N, b) &= \frac{1}{N} \overbrace{\left(m_c \omega_T(N, b) Q_c b + m_s \omega_T(N, b) Q_s (1 - b) \right)}^{\text{Suma de todos los recursos} \\ &\quad \text{(con } m_s \text{ Caras y } m_s \text{ Secas)}} \\ &= \omega_T(N, b) \underbrace{\left(\frac{m_c}{N} Q_c b + \frac{m_s}{N} Q_s (1 - b) \right)}_{r(N, b): \text{ Tasa de crecimiento}} \end{aligned} \quad (3)$$

Y la tasa de crecimiento de los individuos pasa a ser el promedio de todos los resultados del grupo. La reducción de fluctuaciones que genera este simple acto de intercambio de recursos, hace que la tasa de crecimiento de todos los individuos se vuelve positiva. Ésta es la *propiedad evolutiva*. A través de la cooperación podemos reducir aun más las fluctuaciones, aumentando así la tasa de crecimiento de todos sus miembros.

	ω_0	Δ	$\omega_1(b)$	Δ	$\omega_2(b)$
A no-coop	1	1,5	1,5	0,6	0,9
B no-coop	1	0,6	0,6	1,5	0,9
A coop	1	1,5	1,05	0,6	1,1
B coop	1	0,6	1,05	1,5	1,1

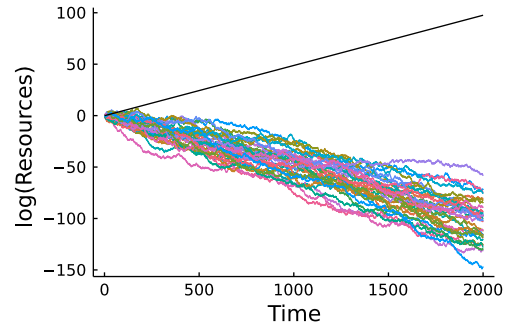


Figura 6. La cooperación le permite a los individuos alcanzar tasas de crecimiento que jamás obtendrían solos. En la tabla (izquierda) Δ representa el cambio en los recursos que sufren los individuos de forma aleatoria, con $b = p = 0,5$. En la figura (derecha), las curvas de colores son las trayectoria de los recursos jugando individualmente, y la recta negra es la trayectoria de los recursos individuales jugando en grupos cooperativos grandes.

Propiedad de especiación. Si bien jugando individualmente nos veíamos obligados a apostar ignorando los pagos que ofrece la casa de apuestas, una vez que emerge la cooperación deja de ser necesario reducir las fluctuaciones por diversificación individual y aparece una ventaja a favor de la especialización cooperativa, que permite sacar provecho de la mejor opción disponible, aumentando aún más la tasa de crecimiento de todos los individuos del grupo cooperativo. A medida que el tamaño del grupo cooperativo crece, la apuesta óptima se va especializando hacia la mejor opción disponible (figura 7). Ésta es la *propiedad de especiación*. Cuando el tamaño del grupo tiende a infinito, la tasa de crecimiento pasa a ser la media aritmética de los posibles resultados de las apuestas.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} r(N, b) = p Q_c b + (1 - p) Q_s (1 - b) \quad (4)$$

Y la puesta óptima es apostar todo a la mejor opción, $b^* = 1$.

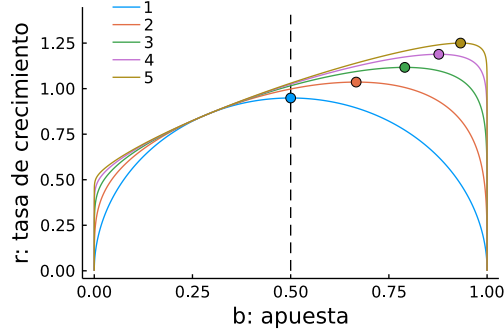


Figura 7. Tasa de crecimiento para grupos de tamaño 1 a 5 (colores), para todas las posibles apuestas (eje x). A medida que aumenta el tamaño del grupo, la apuesta óptima se va especializando hacia la opción mejor paga por la casa de apuesta.

Propiedad ecológica. En este caso, todos los individuos están sujetos a procesos estocásticos que, si bien son independientes, tiene para todos ellos la misma probabilidad que no cambia en el tiempo. En la naturaleza, por el contrario, estamos expuestos a variabilidades espacio-temporales, como las estaciones del año. Para dar un ejemplo, supongamos que la moneda oscila entre dos probabilidades de que salga Cara, $p_1 = 0,2$ y $p_2 = 0,6$. En los pasos temporales impares, la moneda tiene probabilidad p_1 en el hemisferio A y p_2 en el hemisferio B. Y a la inversa en los pasos temporales pares. En casos como estos la variabilidad del proceso produce una ventaja adicional en favor de los grupos con mayor heterogeneidad interna. Ésta es la *propiedad ecológica*. Sea h la proporción de individuos en el hemisferio A. La tasa de crecimiento en un ejemplo simple, en el que el tamaño del grupo es infinito y en el que los individuos se especializan la apuesta correspondiente a la etapa del ciclo que experimentan, es

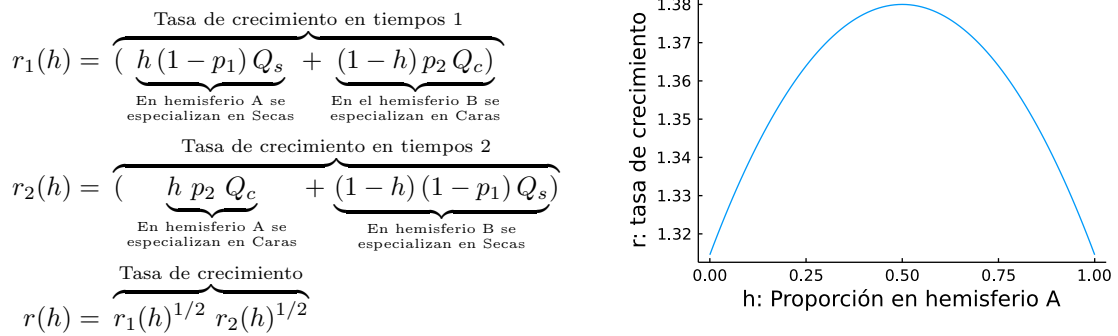


Figura 8. En la figura vemos la tasa de crecimiento de los individuos en función de la proporción de individuos en el hemisferio A. La tasa de crecimiento se maximiza cuando la heterogeneidad entre individuos es máxima.

Esta tasa de crecimiento se maximiza cuando la distribución entre hemisferios es en partes iguales, con $h = 0,5$ (figura 8).

Propiedad mayor y menor. Durante mucho tiempo se creyó que para que la cooperación evolucione debía resolverse primero lo que se conoce como “dilema del prisionero”. En él, cooperar implica un costo c para que el otro individuo reciba un beneficio de valor v , con $v > c$, y desertar significa negarse a cooperar y no conlleva ningún costo (ver matriz en figura 10).

$$\begin{array}{c|cc} & \text{Otro} & \\ \hline \text{Focal} & C & D \\ \hline C & (v-c, -c) & \\ D & (v, 0) & \end{array}$$

Este ejemplo es una dilema debido a que individualmente desertar siempre es mejor que cooperar, a pesar de que la mutua cooperación sea mejor que la mutua deserción.

En nuestro ejemplo de las apuestas, habría una tentación por desertar: dejar de aportar al fondo común mientras se sigue recibiendo la cuota del fondo común. Si la evolución estuviera sujeta a un dilema del prisionero, entonces desertar en grupos enteramente cooperativos debería ofrecer al individuo una tasa de crecimiento más alta que cooperar. En la figura 10 mostramos la tasa de crecimiento de individuos en grupos cooperativos de tamaño 100 con 0, 1 y 2 desertores. Allí se puede observar que los

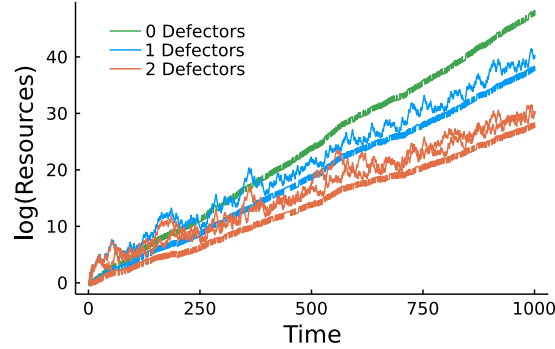


Figura 9. Tasa de crecimiento de los individuos dentro de grupos cooperativos (colores) con 0, 1 y 2 desertores. Las curvas con mayor variabilidad son los individuos desertores, el resto son los cooperadores.

desertores tienen una tasa de crecimiento menor que la tenían cuando cooperaban (*propiedad mayor*), a pesar de que inicialmente obtienen un beneficio circunstancial (*propiedad menor*). El primer agente que decide desertar unilateralmente (grupo azul con 1 desertor) reduce su tasa de crecimiento y sus recursos están por debajo de los recursos que tenía previamente dentro del grupo enteramente cooperador (grupo verde con 0 desertores). La reducción de recursos le ocurre incluso al segundo individuo que cambia de comportamiento cooperador a desertor. Es decir, los bienes comunes no tiene la estructura del dilema del prisionero como habitualmente se afirma en la literatura. Bajo procesos de selección multiplicativa no se puede sacar provecho mediante la deserción porque, al aumentar las fluctuaciones los cooperadores de quienes se depende, aumenta también las propias fluctuaciones afectando negativamente la propia tasa de crecimiento de largo plazo. En todos los casos, la tasa de crecimiento se maximiza mediante mutua cooperación.

3. Consecuencias de las propiedades epistémico-evolutivas

Las propiedades de la función de costo epistémico-evolutiva no son solo teóricas, tiene consecuencia concretas para la vida y el conocimiento. La propiedad mayor nos ofrece un argumento para explicar la emergencia permanente de las *transiciones evolutivas mayores* en la historia de la vida (mencionada en la primera sección) en las que entidades individuales pasan a formar parte de unidades cooperativas superiores a través del intercambio de recursos (célula eucariota, organismo multicelular, sociedad, ecología). Pero también permite explicar la emergencia de *transiciones epistémicas mayores* en la historia del conocimiento, en las que hipótesis individuales se agregan para formar hipótesis de nivel superior a través del intercambio de conocimientos. Por otro lado, la propiedad menor nos ofrece un argumento para explicar la ventaja circunstancial que las variantes desertoras pueden obtener individualmente en el corto plazo y las crisis que su emergencia produce a nivel global en el largo plazo.

3.1. Transición epistémica mayor.

En la historia del ser humano, la cooperación epistémica por transmisión de conocimiento entre individuos, tuvo un efecto positivo radical para nuestra especie. Antes de la transición cultural, estábamos en grave peligro de extinción, lo que se evidencia en la baja diversidad del genoma humano, respecto incluso de los homínidos más cercanos [9]. Pero cuando el conocimiento, que antes debía ser redescubierto individualmente, pasó a ser un recurso común transmitido de generación en generación, comenzamos a ser capaces de ocupar todos los nichos ecológicos de la tierra como ningún otro vertebrado terrestre lo

había logrado antes. Organizados en pequeñas sociedades nómadas, logramos llegar caminando de África hasta sud América (flechas de la figura 10a).

La cultura es información no-genética que se transmite por vía social, de un individuo a otro. Estos sistemas de procesamiento de información distribuida no son exclusivo de los seres humanos. Muchos animales son capaces de transmitir información por vía social, lo que produce la emergencia de tradiciones simples. En algunas como las ballenas, delfines, primates y aves las tradiciones pueden ser bastante complejas, llegando a desarrollar un conjunto amplio de conocimientos que se adquieren primero por experiencia individual y luego son imitados por el resto [10]. Todas ellas, sin embargo, son manifiestamente más simples que la cultura humana.

A diferencia de otros animales, los humanos acumulamos adaptaciones culturales, modificaciones sucesivas persistentes en el tiempo, produciendo sistemas culturales cada vez más complejos. Ciertamente existen muchas adaptaciones raras, que son particulares a ciertas especies. Pero los elementos que son realmente buenos, como el ojo, han evolucionado repetidamente entre las millones de especies animales del mundo. Entonces, dado que la cultura ha hecho a los humanos extraordinariamente exitosos, ¿Por qué las otras especies no han adquirido esas capacidades? ¿Por qué solo los humanos?

Entre los homínidos, los humanos se distinguen por una serie de rasgos que incluyen prolongados períodos juveniles, intervalos cortos entre nacimientos y una prolongada vida posreproductiva [11]. Para explicar la integración de los procesos biológicos, cognitivos y sociales que permite a los humanos desarrollar culturas complejas ha sido necesario un proceso extenso de coevolución genético-cultural. La evolución del lenguaje es un ejemplo claro. Las características genéticas que nos permiten escuchar, hablar y aprender el lenguaje serían inútiles sin lenguajes complejos para aprender. Y a la inversa, para que evolucionen estas características innatas es necesario la presencia previa de alguna lengua primitiva que proporcionara un entorno cultural que presionara a favor de la selección de mejores habilidades lingüísticas innatas. A través de rondas repetidas de coevolución, surgieron lenguajes complejos y el costoso aparato necesario para operarlos.

Antes del surgimiento de los humanos anatómicamente modernos (masa cerebral actual) y de los humanos conductualmente modernos (lenguaje), surgió en África una linaje emocionalmente moderno, con capacidades para el entendimiento mutuo [12]. A diferencia de nuestros parientes más cercanos (chimpancés, bonobos, gorilas y orangutanes), en los que la crianza está bajo supervisión estricta de la madre, hace aproximadamente 3.5 millones de años, nuestros ancestros comenzaron a desarrollar un tipo de crianza cooperativa. Esta forma de crianza cooperativa produjo un ambiente que favoreció la selección de jóvenes capaces de monitorear y comprender las intenciones de los demás, y de transmitir a sus cuidadores sus propias necesidades, dando inicio a un largo proceso de coevolución genético-cultural [12]. Hoy las capacidades para desarrollar culturas complejas son parte de nuestra biología.

La comprensión mutua, la imitación y el lenguaje permitieron la transmisión de conocimientos basados en la experiencia de otros (*aprendizaje social*), dando inicio a un proceso inter-generacional de acumulación de innovaciones que permitió a las poblaciones humanas adaptarse rápidamente a los cambiantes contextos ambientales. Lo que antes debía ser redescubierto una y otra vez mediante costosa experiencia individual, ahora podía ser transmitido a la siguiente generación. En las culturas humanas, la acumulación de innovaciones produce un repertorio tecnológico que nadie es capaz de redescubrir individualmente en un período de vida, incluso en las sociedades cazadoras recolectoras aparentemente simples.

Las tecnologías de reciprocidad ecológica produjeron la aparición independiente de la domesticación de especies animales y vegetales, el desarrollo de caracteres genéticos que surgen como resultado de una interacción simbiótica prolongada entre las especies. La agricultura surgió de forma paralela en los seis grandes sistemas geográficos de la tierra en África subsahariana, Oriente medio, China, Oceanía, América del Norte y América del Sur (puntos rojos de la figura 10a). Allí se desarrollaron los principales centros poblacionales de la humanidad. El aumento de la población intensificó aun más los procesos de evolución cultural acumulativa, haciendo de estas regiones los principales centros tecnológicos de la humanidad.

Para el año 1400 el mundo florecían de sociedades prósperas. En el mundo Árabe se comerciaban productos desde el océano Atlántico en España, hasta el océano Pacífico en las Filipinas. El océano Pacífico estaba totalmente ocupado, y ya se habían producido intercambios entre Oceanía y América del Sur, que se refleja en la genética de las poblaciones actuales [13] (figura 10b). Y en el jardín de la diversidad genética y cultural humana, África subsahariana, se desarrollaba entre otras, la sociedad Bantu. Pero China era para ese entonces el principal centro productivo y tecnológico del mundo después de 2 milenios.

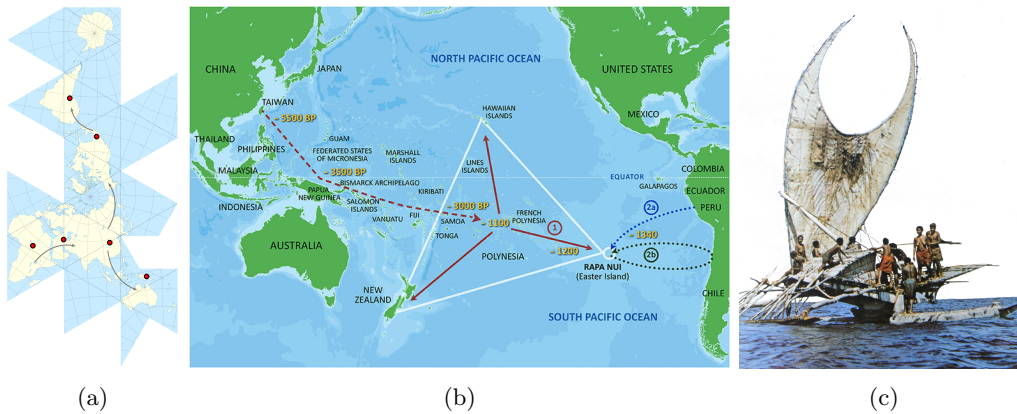


Figura 10. (a): Poblamiento del mundo (flechas) y desarrollo independiente de la agricultura (puntos) en una proyección del mapamundi que preserva los tamaños relativos de los continentes. (b): El aumento de la población hace de los centros agrícolas regiones ricas en innovaciones tecnológicas, y para el año 1300 ya se habían producido intercambios entre el Pacífico y América del sur. (c): Imagen de la extraordinaria tecnología de navegación utilizada en el Pacífico.

John Needham, el británico que dedicó su vida a recopilar la monumental historia científica y técnica de China, reconoce que comenzó a estudiar el tema motivado por responder la pregunta de por qué sólo Europa occidental había logrado el avance científico.

When I first formed the idea, about 1938, (...) I regarded the essential problem as that of why modern science had not developed in Chinese civilisation (or Indian or Islamic) but only in that of Europe [14].

Luego de 60 años de investigaciones, Needham se ve obligado invertir la pregunta.

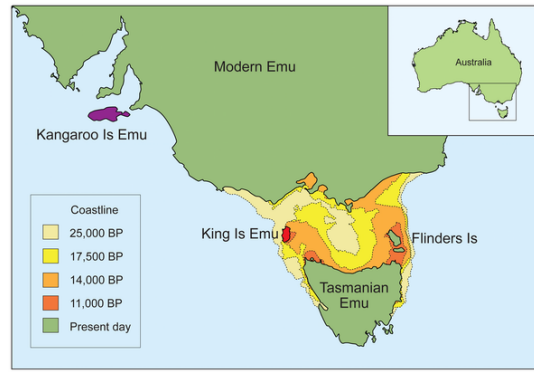
Why, between the -1th century and the 15th century, was Chinese civilisation much *more* efficient than occidental in gaining natural knowledge and in applying it to practical human needs? [14]

3.2. Coyuntura colonial-moderna

Desde Hegel hasta la fecha, las explicaciones eurocéntricas intentan explicar la prosperidad actual de occidente a través de una causa interna: la “ética protestante” de Max Weber [15], la “mentalidad burguesa” de José Luis Romero [16], o más recientemente el “sistema de parentesco” de Joseph Henrich [17]. La paradoja que no puede responder es cómo una sociedad sumida en un proceso de involución cultural único, como la sociedad feudal de la “edad media”, pudo generar de repente un proceso aparentemente extraordinario de desarrollo científico y técnico de la modernidad.

Así como la cooperación favorece los proceso de innovación y acumulación cultural, el aislamiento está asociado a pérdidas masivas de información cultural. El ejemplo más paradigmático es el aislamiento total que ocurrió con la separación de Tasmania del continente Australiano por la subida del nivel del mar a comienzos del Holoceno. La evidencia indica que las sociedades que permanecieron en la isla de Tasmania perdieron gran parte de su cultura tecnológica. La principal hipótesis sugiere que la reducción del tamaño efectivo de la población fue la causa de la pérdida cultural [18]. La capacidad de almacenamiento (e innovación) de tecnologías complejas requeriría un tamaño mínimo de la población, incluso en sociedades cazadoras-recolectoras.

De forma similar, la masiva destrucción de la diversidad cultural al interior del imperio Romano y el conflicto permanente con las sociedades vecinas, generó el aislamiento parcial de Europa occidental del sistema mundo, conduciéndola a contramano del resto del mundo a un largo proceso de involución cultural y de violencia interna conocido como “Edad media”. En esta etapa, se generalizó al interior de la sociedad feudal el criterio de autoridad como fundamento del “saber auténtico”. Un nuevo sistema penal, sin límites, renació de los llamados *libris terribilis* y las instituciones heredadas del imperio Romano de



(a) Tasmania

Figura 11. Aislamiento

occidente comenzaron a regular las relaciones comunitaria de reproducción sexual de forma más detallada que la propiedad privada. La guerra contra las mujeres se formaliza con la publicación del *Malleus maleficarum* en 1484 (caza de brujas), que será el segundo best seller después de la Biblia durante los siguientes 200 años en Europa occidental [19].

Aunque exista una desventaja evolutiva de la deserción, ciertas coyunturas pueden producir su emergencia en el corto plazo (*propiedad menor*). Así es que la coincidencia de un conjunto de eventos, que se desencadenaron por la masiva migración feudal a América, puso de repente a esa sociedad, históricamente marginal, en una situación de privilegio mundial. Las enfermedades transmitidas por los exploradores feudales eliminó, al menos, a 2/3 de la población americana. Sin embargo, no se produce ningún giro geopolítico hasta que en 1546 los exploradores feudales descubren la montaña de plata de Potosí, metal que China había incorporado recientemente como una de sus monedas oficiales. Gracias a ella, un cuarto de siglo después, Europa occidental comienza a romper su aislamiento (batalla de Lepanto 1571) y dar inicio a un largo ciclo de importación de tecnología extranjera, principalmente China.

Cuando la sociedad feudal empieza a adquirir una posición de privilegio en el sistema mundo, comienza al interior de esta sociedad un nuevo debate sobre las fuentes de validación del conocimiento. En esta época, el criterio de autoridad de la Edad Media como fundamento del saber auténtico comienza a ser reemplazado por los criterios de experiencia personal. Algunos entendieron el concepto de experiencia como “evidencia intelectual” (racionalistas) y otros como “evidencia sensible” (empiristas), dos grupos de exigencias que se consideraron al principio incompatibles entre sí: el de universalidad y necesidad por un lado, y el de acreditación empírica por otro [20].

Al mismo tiempo, la posición de privilegio mundial permitió a la sociedad feudal trasladar parte de su estructura de dominación afuera de su frontera. El argumento de superioridad moral que será empleado durante toda la colonial-modernidad hasta el presente, lo desarrolla por primera vez Ginés de Sepúlveda justo cuatro años después del descubrimiento de la plata de Potosí [21].

Será siempre justo [...] que tales gentes [bárbaras] se sometan al imperio de príncipes y naciones más cultas y humanas [...] Y si rechazan tal imperio se les puede imponer por medio de las armas, y tal guerra será justa según el derecho natural lo declara [...] En suma: es justo, conveniente y conforme a la ley natural que los varones probos, inteligentes, virtuosos y humanos dominen sobre todos los que no tienen estas cualidades.

El sujeto masculino blanco se coloca a sí mismo como modelo del interés general y valor universal, reduciendo al resto de los seres vivos a meros objetos de uso. La sociedad colonial-moderna, y su ciencia, repite la estructura verticalista y punitivista de la sociedad feudal, ahora con un alcance global. Todos los conocimientos que la nueva sociedad colonial-moderna va incorporando del resto de comunidades del mundo se les borra su verdadero origen histórico y se las enaltecen como surgimientos espontáneos internos [22].

La plata de América fluyó en todas las direcciones, principalmente en dirección a China. Más de dos siglos después del acceso a la plata americana, Europa occidental seguía consumiendo más productos asiáticos de los que podía exportar a Asia. Todavía a comienzos del 1800 Europa occidental seguía

teniendo déficit comercial con China, que desde mediados de 1700 financiaba mediante el narcotráfico de opio a pesar de la prohibición China. El opio, un producto lujoso utilizado en China como medicina (raramente como estupefaciente), fue prohibido por los emperadores chinos en 1729 debido a que su abundancia hacía crecer lentamente la cantidad de adictos [23]. Las consecuencias fueron más graves cuando, después de las independencias americanas, en 1818, los británicos comienzan a comercializar una mezcla de opio más barata y potente. El número de adictos llegó a ser lo suficientemente alarmante, y en 1839 China comete el error de declarar la guerra al Narco-Estado británico en su propio territorio. Los resultados fueron terribles: China pierde 1/5 de su población y queda sumida durante un siglo por invasiones extranjeras.

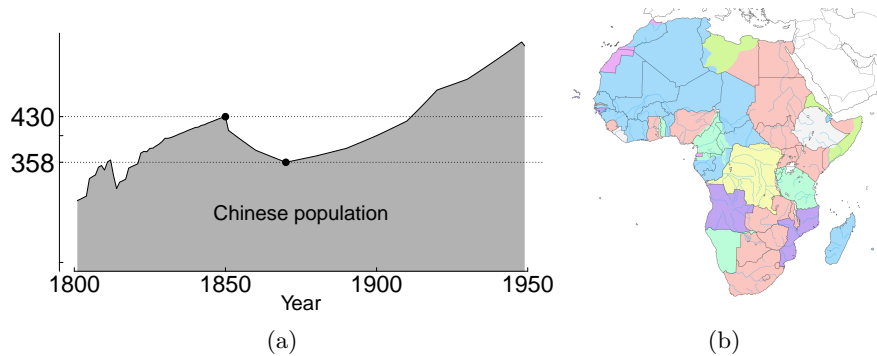


Figura 12. (a): La derrota de China contra el narco-estado británico en su propio territorio tuvo consecuencias terribles. (b): Recién a partir de 1850 comienza la colonización de África continental y los extensos territorios de América todavía autónomos.

Luego de la derrota de China por parte del narco-estado británico, se establece por primera vez la hegemonía de Europa occidental en el sistema mundo y comienza el proceso de colonización de África continental y de los extensos territorios americanos que todavía seguían en manos de comunidades locales, entre los principales. Comienza la era de genocidios. En todas las partes del globo, los exploradores y etnógrafos fueron documentando la pérdida completa de culturas debida al avance del frente colonial-moderno, estatal o privado, sobre las autonomías locales. Es una época de avances científicos y tecnológicos por un lado, pero es al mismo tiempo la era masiva pérdida de diversidad cultural global. En un mundo de comunidades debilitadas, se expande la cosmovisión individualista e instrumental de nuestro tiempo, la naturaleza como cosa, las personas como cosas, y se desencadena así la masiva pérdida de biodiversidad actual.

La ventaja a favor de la diversificación y la cooperación no es solo teórica, su ruptura tiene consecuencia para la vida y el conocimiento. A pesar de todos los avances, la ciencia metropolitana no fue capaz de compensar la pérdida de conocimientos milenarios provocada por la colonial-modernidad, y como consecuencia de la masiva pérdida de la diversidad cultural global vivimos en la actualidad una grave crisis ecológica que no deja de profundizarse.

4. Tecnologías de reciprocidad epistémico-evolutivas

Debido a que, en los procesos de selección epistémico-evolutivos, los impactos de las pérdidas son más fuertes que los de las ganancias (un único cero en la secuencia produce una extinción irreversible) existe una ventaja a favor de las variantes (hipótesis o formas de vida) que reducen las fluctuaciones. Así es que la experiencia acumulada por las comunidades humanas alrededor del mundo condujo a una obligación universal de dar y de recibir [24], y al desarrollo de tecnologías de reciprocidad que tienen la función de re-activar los vínculos comunitarios mediante ritos (festivos o coercitivos) de intercambios [19, 25]. Estas tecnologías de reciprocidad han emergido de forma independiente a través de las generaciones debido a que favorecen la supervivencia de las comunidades en el tiempo, gracias a que reducen las fluctuaciones individuales que ponen en peligro la estabilidad del grupo.

La teoría de la probabilidad nace en 1648 justamente como respuesta a la pregunta de cuál es el *precio justo* en contextos de incertidumbre. El problema que analizaban Pascal y Fermat en sus cartas

es equivalente al siguiente. Tiramos dos veces la moneda. Si sale seca S en la primera y en la segunda, una persona (en rojo) le hace un favor a la otra (en azul). En caso contrario, el favor se invierte. ¿Cuál es el valor justo de la reciprocidad en este contexto de incertidumbre?

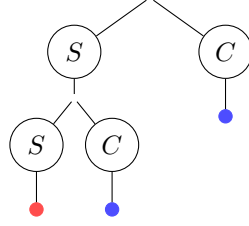


Figura 13. El problema del *valor justo* que da inicio a la teoría de la probabilidad

La respuesta a la que arribaron Pascal y Fermat es que el valor de los favores tiene que ser inversamente proporcional a la probabilidad de hacer el favor. Si la moneda es no sesgada, hay $1/4$ de probabilidad de que salgan dos secas (terminal roja), $1/4$ de que salga seca en la primera y cara en la segunda (terminal azul) y $1/2$ de que salga cara en la primera (terminal azul). Concluyeron que, como la probabilidad de que la persona azul haga un favor es $3/4$, entonces la relación de favores debe ser de 3 a 1 para que el intercambio sea justo (si la persona roja hace favores por un valor equivalente a 3, la azul tiene que devolver los favores con un valor de 1). Por un lado, calcular la probabilidad de eventos mutuamente excluyentes como suma de sus probabilidades elementales constituye el axioma fundamental de Kolmogorov a partir del cual se suele montar toda la teoría de la probabilidad. Por otro lado, ofrecer pagos inversos a la probabilidad ($Q_{\text{rojo}}^* = p_{\text{rojo}}^{-1}$, $Q_{\text{azul}}^* = (1 - p_{\text{rojo}})^{-1}$) garantiza a la coexistencia entre una casa de apuestas y un conjunto infinito de individuos cooperativos.

$$p_{\text{rojo}} Q_{\text{rojo}}^* b + (1 - p_{\text{rojo}}) Q_{\text{azul}}^* (1 - b) = b + (1 - b) = 1 \quad (5)$$

Sin importa la apuesta b que se elija, la tasa de crecimiento de un grupo cooperativo de tamaño infinito es siempre 1.

Las tecnologías de reciprocidad reales, capaces de administrar la vida común, siempre han emergido de la coexistencia estable con los sistemas ecológicos locales, lo que garantiza la supervivencia de ese pueblo y esa cultura en el tiempo. Los pueblos que practican la coexistencia intercultural y ecológica exhiben lógicas “plurales y condicionales” cualitativamente similares a la de la aplicación estricta de la probabilidad, que fomentan la convivencia con otras formas de vida, otros pueblos y otros conocimientos [26]. El remplazo repentino de estos sistemas culturales locales por instituciones externas, tanto privadas como públicas, que exhiben lógicas “singulares y definitivas” cualitativamente similar al lenguaje tradicional de la ciencia colonial-moderna, ha producido devastadoras consecuencias ecológicas [27, 28]. Del mismo modo que seleccionar una única hipótesis tiene consecuencias negativas conocidas en probabilidad (overfitting), la imposición de un único tipo de sociedad está teniendo consecuencias ecológicas cada vez más negativas. El derecho de los pueblos a desplegar su propio Proyecto Histórico, a habitar en autonomía sus sistemas ecológicos locales, se sustenta en el hecho de que el conocimiento cultural para administrar la vida común evoluciona con el tiempo, de generación en generación, hasta condensarse en hábitos, ritos y normas consuetudinarias.



(a) Canang sari

(b) Pachamama

Figura 14. Tecnología de reciprocidad.

Así como el enfoque bayesiano adapta el conocimiento creyendo al mismo tiempo en A y no A , una sociedad plurinacional se adapta a la vida a través de la convivencia recíproca entre comunidades autónomas.

Referencias

- [1] Taylor PD, Jonker LB. Evolutionary stable strategies and game dynamics. *Mathematical biosciences*. 1978;40(1-2):145–156.
- [2] Czégel D, Zachar I, Szathmáry E. Multilevel selection as Bayesian inference, major transitions in individuality as structure learning. *Royal Society open science*. 2019;6(8):190202.
- [3] Czégel D, Giaffar H, Tenenbaum JB, Szathmáry E. Bayes and Darwin: How replicator populations implement Bayesian computations. *BioEssays*. 2022; p. 2100255.
- [4] Maynard Smith J, Szathmáry E. *The Major Transitions in Evolution*. New York: Oxford University Press; 1995.
- [5] Szathmáry E, Maynard Smith J. The major evolutionary transitions. *Nature*. 1995;374(6519):227–232.
- [6] Szathmáry E. Toward major evolutionary transitions theory 2.0. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015;112(33):10104–10111.
- [7] Yaari G, Solomon S. Cooperation evolution in random multiplicative environments. *The European Physical Journal B*. 2010;73(4):624–632.
- [8] Peters O, Adamou A. An evolutionary advantage of cooperation. *Reserchers One*. 2019;.
- [9] Hrdy SB. *Mothers and others*. Harvard University Press; 2011.
- [10] Aplin L. Culture in birds. *Current Biology*. 2022;32(20):R1136–R1140.
- [11] Jones JH. Primates and the evolution of long, slow life histories. *Current Biology*. 2011;21(18):R708–R717.
- [12] Hrdy SB, Burkart JM. The emergence of emotionally modern humans: implications for language and learning. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2020;375(1803):20190499.
- [13] Ioannidis AG, Blanco-Portillo J, Sandoval K, Hagelberg E, Miquel-Poblete JF, Moreno-Mayar JV, et al. Native American gene flow into Polynesia predating Easter Island settlement. *Nature*. 2020;583(7817):572–577.
- [14] Needham J, Girdwood Robinson K, Huang R, Elvin M. *Science and Civilization in China. Vol 7 Pt 2. General Conclusions and Reflections*. University Press; 2004.
- [15] Weber M. *La ética protestante y el espíritu del capitalismo*. Fondo de cultura económica; 2012 [1905].
- [16] Romero JL. *La revolución burguesa en el mundo feudal*. Sudamericana; 1967.
- [17] Henrich J. *The WEIRD people in the world: How the West became psychologically peculiar and particularly prosperous*. Penguin UK; 2020.
- [18] Henrich J. Demography and cultural evolution: how adaptive cultural processes can produce maladaptive losses-the Tasmanian case. *American Antiquity*. 2004;69(2):197–214.
- [19] Zaffaroni ER, Rep M. *La cuestión criminal*. Planeta; 2013.
- [20] Samaja J. *Epistemología y metodología: elementos para una teoría de la investigación científica*. EUDEBA; 1999.
- [21] Dussel E. *El primer debate filosófico de la modernidad*. CLACSO; 2020.
- [22] Dussel E. *El Encubrimiento Del Otro*. Ediciones Antropos; 1992.
- [23] Pomeranz K, Topik S. *The World That Trade Created: Society, Culture, and the World Economy, 1400 to the Present (4th edition)*. Routledge; 2018.
- [24] Mauss M. Essai sur le don: forme et raison de l'échange dans les sociétés archaïques. *L'Année sociologique*. 1923;1:30–186.
- [25] Segato RL. *La guerra contra las mujeres*. Traficantes de sueños España; 2016.
- [26] Segato RL, McGlazer R. A manifesto in four themes. *Critical Times*. 2018;1(1):198–211.
- [27] Segato RL. *La crítica de la colonialidad en ocho ensayos: y una antropología por demanda*. Prometeo libros; 2013.
- [28] Ostrom E. Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *American economic review*. 2010;100(3):641–72.