

Procesamiento predictivo y bayesianismo: una brevísima aproximación filosófica-probabilística al modelamiento predictivo de la mente

Lucas Hinojosa-López^a

Resumen

El procesamiento predictivo es una de las tantas aproximaciones estadísticas a la comprensión del funcionamiento de la mente de los últimos quince años. El modelamiento estadístico en la comprensión del cerebro y la mente son comprensiones normativas, en tanto que proponen que las funciones de la mente operan en conjunto con las normas de las probabilidades. El procesamiento predictivo sería entonces una forma de modelar probabilísticamente las funciones mentales, en donde el cálculo de las probabilidades y su análisis filosófico cumplen un rol interesante de analizar. El objetivo de este trabajo es doble: en primer lugar (1) se busca presentar el procesamiento predictivo como una aproximación filosófico-estadística al modelamiento de la mente; y en segundo lugar (2) se analizará el rol que cumple el bayesianismo en dicha evaluación probabilística-estadística, en el que las reglas bayesianas explicarían, al menos parcialmente, las distintas operaciones predictivas de la mente

Palabras Clave: Procesamiento predictivo, Regla de Bayes, Probabilidad, Creencia, Mente.

1. Introducción

El procesamiento predictivo (o *predictive processing* en inglés) es un marco teórico en ciencias cognitivas y neurociencias que sugiere que

^aUniversidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
Contacto: lucas.hinojosa@uv.cl

el cerebro humano no solo reacciona a la información sensorial que recibe del entorno, sino que también genera activamente predicciones sobre esa información y las utiliza para interpretar y dar sentido a su entorno. Lo que propone el marco del procesamiento predictivo es que la percepción está continuamente construyéndose a través de un ciclo continuo de predicciones y correcciones basadas en la comparación entre las expectativas del cerebro y las entradas sensoriales reales (Friston 2005).

Es posible comprender el procesamiento predictivo (PP de aquí en adelante) como una aproximación estadística a la comprensión del cerebro y la mente (e.g. Hohwy 2013; Clark 2016) en donde las acciones o formulaciones de hipótesis realizadas por agentes en contextos de desenvolvimiento habituales serían producto de un cálculo interno probabilístico del cerebro y la mente. Se espera a partir de este marco que todas las funciones y disfunciones mentales se puedan entender como respondiendo al principio de minimización de error de predicción. Según este principio, el cerebro ajusta constantemente sus modelos internos para reducir la discrepancia entre las predicciones generadas y las entradas sensoriales reales (Friston 2005). Este proceso cíclico mejora y reajusta la precisión de las predicciones y optimiza la adaptación perceptual. Hablaremos de este principio más adelante.

El bayesianismo tiene un lugar importante en este marco teórico ya que el ajuste constante del PP radica en la naturaleza probabilística de las predicciones y la actualización de las creencias. El cerebro, al predecir y comparar constantemente las expectativas con las entradas sensoriales reales, sigue un marco bayesiano. La teoría de Friston (2010) conecta el procesamiento predictivo con la inferencia bayesiana, donde el cerebro formula y actualiza constantemente creencias probabilísticas para minimizar la incertidumbre. Este enfoque bayesiano es importante en términos predictivos y probabilísticos, pues ayuda a explicar cómo un modelo mental interno actual podría ajustarse para mejorar la precisión predictiva en entornos dinámicos. El modelamiento bayesiano puede encontrar un territorio común al procesamiento predictivo debido a este poder unificador que brinda el principio de minimización de error de predicción. En general, se espera que el PP pueda dar cuenta del rol agencial de un agente a partir del análisis probabilístico y estadístico del reajuste de hipótesis que nos permiten actuar en el mundo.

A continuación, presentaremos más en detalle el enfoque del PP, su utilidad para la comprensión del funcionamiento de la mente y qué relación tiene con el cálculo de probabilidades en el proceso predictivo.

Defenderemos que el bayesianismo tiene un rol importante para el PP en tanto que explica la actualización de creencias e hipótesis que nos permiten actuar.

2. Procesamiento Predictivo (PP)

Como ya se ha adelantado previamente, el procesamiento predictivo representa una perspectiva revolucionaria en la neurociencia cognitiva y que desafía la visión convencional de cómo el cerebro interactúa con su entorno (Clark 2016). Lo anterior se debe a la idea de que el cerebro no es solo un receptor pasivo de información sensorial, sino que constantemente genera predicciones activas sobre el mundo que le rodea (Friston 2005; Hohwy 2013). En este sentido, la teoría del procesamiento predictivo propone que la percepción no es simplemente el resultado de una reacción a estímulos externos, es decir, no opera mediante la mecánica de *inputs* y *outputs*, sino más bien mediante el resultado de una construcción activa de modelos internos que anticipan y explican eventos futuros.

El enfoque del PP encuentra sus raíces en el trabajo seminal de Karl Friston “A theory of critical responses” (2005) donde formuló sus bases teóricas. Friston propuso el principio de “energía libre” argumentando que el cerebro opera para minimizar la sorpresa o la discrepancia entre sus predicciones internas y las entradas sensoriales reales, cuestión que podríamos llamar incertidumbre. Este principio impulsa un ciclo continuo de ajuste donde el cerebro actualiza constantemente sus modelos internos para optimizar la precisión predictiva y reducir la incertidumbre.

El PP se basa en la premisa de que el cerebro construye activamente su realidad perceptual a través de la anticipación y corrección constante. Durante este proceso, el cerebro formula predicciones sobre los estímulos sensoriales futuros basándose en sus experiencias pasadas y en los patrones aprendidos. Estas predicciones son comparadas con las entradas sensoriales reales y cualquier discrepancia resultante se utiliza para ajustar y refinar modelos internos. De esta forma, el cerebro no solo reacciona al entorno (no solo responde a *inputs*), sino que también se anticipa a él, transformando la percepción en un acto dinámico y proactivo (Parr et al. 2022).

El principio de minimización del error de predicción es de suma relevancia en este contexto. Este principio establece que el cerebro ajusta sus modelos internos para reducir la discrepancia entre las predicciones

generadas y las entradas sensoriales reales. La minimización del error de predicción se convierte en una herramienta clave para mejorar la adaptación perceptual y optimizar la capacidad del cerebro para predecir eventos futuros. El trabajo de Friston (2010) extiende esta idea al principio de energía libre, que formaliza cómo el cerebro minimiza la incertidumbre y optimiza sus creencias probabilísticas para explicar y predecir el mundo.

Imaginemos que caminamos por un bosque y escuchamos un sonido crujiente detrás de unos arbustos. Inevitablemente, generaremos una predicción sobre la posible fuente de dicho sonido: digamos en este caso que la fuente del sonido es un animal. Esta predicción se construye a partir de experiencias previas y en modelos internos construidos a lo largo del tiempo en los que mi experiencia me indica que resulta lógico (i.e., esperable en función al contexto) para el lugar en el que estoy, que un conejo o quizás un perro haya pisado hierba seca o ha movido un arbusto.

Decidimos acercarnos al arbusto para indagar e intentar dilucidar nuestra interrogante. Resulta que el sonido es causado por el viento moviendo ramas secas. En este punto hay una discrepancia entre la predicción inicial del cerebro (i.e., la presencia de un animal) y la realidad percibida (el viento moviendo las ramas). El cerebro y nuestra mente utilizan estas discrepancias o errores predictivos para reajustar los modelos internos.

Esto sugiere, según el principio de minimización de error de predicción (Friston 2010), que cuando escuchemos un sonido similar en un medio boscoso estaremos mejor preparados para predecir que el sonido podría ser causado por el viento en lugar de un animal. Este proceso iterativo de hacer predicciones, enfrentarse a la realidad y ajustar modelos internos es necesario para minimizar el error de predicción y mejorar la adaptación perceptual.

El nexa entre el procesamiento predictivo (e.g., Hohwy 2013) y la inferencia bayesiana (e.g., Hartigan 1983) revela una conexión profunda en la forma en que el cerebro aborda la incertidumbre y actualiza sus creencias. La teoría del PP desarrollada por K. Friston se asocia estrechamente con los principios fundamentales de la inferencia bayesiana. La relación entre ambos marcos teóricos resalta cómo el cerebro no solo predice activamente, sino que también utiliza la información actual y previa para ajustar sus creencias y reducir la incertidumbre. Abordaremos esto en el apartado siguiente.

3. El rol de la inferencia bayesiana en el procesamiento predictivo

La inferencia bayesiana es un enfoque estadístico que se basa en la actualización de creencias a medida que se acumula nueva evidencia. Este proceso refleja la idea de que el conocimiento es inherentemente incierto y que la certeza se alcanza mediante una actualización continua basada en información disponible (Earman 1992). En el contexto del PP, la inferencia bayesiana se convierte en la piedra angular que fundamenta cómo el cerebro optimiza sus modelos internos y ajusta sus creencias.

Como se mencionó anteriormente, autores como Friston (2005; 2010) han propuesto que el cerebro opera para minimizar la incertidumbre, la discrepancia entre las predicciones internas y las entradas sensoriales reales, a través de un constante reajuste probabilístico en las creencias del agente para mantenerse en sintonía con el medio y reducir la incertidumbre.

En el marco de la inferencia bayesiana, las creencias previas se combinan con la nueva evidencia a través de la regla de Bayes (1764) para actualizar las creencias posteriores. Dicha regla es un principio fundamental en teoría de la probabilidad, pues permite actualizar nuestras creencias sobre un evento en función de la evidencia disponible (Easwaran 2011). La regla de Bayes en su versión más simple se obtiene directamente de la probabilidad condicional y el axioma de multiplicación. Se expresa de la siguiente manera:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

En este caso, $P(B)$ corresponde solo a una hipótesis y su complemento que dan la probabilidad total. Sin perjuicio de lo anterior, debe destacarse que lo interesante de la regla es, al menos en el caso de su versión simplificada, calcular la probabilidad total sobre la probabilidad de todas las hipótesis posibles y de las respectivas verosimilitudes.

En esta regla (Parzen 1979) tenemos que:

1. $P(A|B)$ es la probabilidad de que el evento A ocurra dado que B ha ocurrido; es decir, esta es la probabilidad posterior o inversa de A.
2. $P(B|A)$ es la probabilidad de que B ocurra dado que A ha ocurrido.

3. $P(A)$ y $P(B)$ son las probabilidades iniciales de que A y B ocurran, respectivamente.

La probabilidad posterior de determinado evento es producto de (i) la probabilidad anterior y (ii) del *Prior* y de la verosimilitud de la evidencia dada la hipótesis, es decir, A. La probabilidad anterior (aquello a lo que se le suele llamar *Prior*) es la hipótesis que resulta más probable independientemente de cualquier dato que ingrese al sistema interno del agente. Dado el contexto o situación en la que podamos encontrarnos, hay ciertas hipótesis más probables que otras. Por ejemplo, si estoy haciendo clases y siento algo tocando la puerta, resulta más probable que sea un estudiante llegando tarde a la clase en lugar de un pájaro carpintero golpeando la madera de dicha puerta en la región de Valparaíso. Si bien las dos probabilidades podrían explicar el fenómeno, una hipótesis es más probable que otra dado el contexto y porque hay probabilidades anteriores que son mayores: en este caso, la probabilidad de que un estudiante llegue tarde a la clase. Análogamente, el cerebro en el procesamiento predictivo genera predicciones basadas en creencias internas previas y las ajusta a medida que llega nueva información. La adaptación continua refleja la naturaleza bayesiana de cómo el cerebro actualiza sus modelos internos y mejora la precisión predictiva.

La aplicación de la inferencia bayesiana en el procesamiento predictivo se refleja justamente en la formulación de hipótesis y la evaluación de la probabilidad de eventos futuros. En este sentido, el cerebro no solo responde a entradas sensoriales, sino que también utiliza la información previa para calcular la probabilidad de distintos escenarios y generar predicciones más precisas. La hipótesis que tiene la probabilidad posterior mayor es la que finalmente gana la competencia por aparecer en la consciencia (Hohwy 2013): este es el precepto que se forma. Lo anterior supone que la hipótesis que se nos aparezca en primer lugar será la hipótesis con la probabilidad posterior mayor. Esto le permitirá al sistema minimizar el error de predicción en el largo plazo.

El cerebro opera típicamente en condiciones de incertidumbre (Clark 2016). Si hay ruido en el mundo, el sistema debe inferir qué tan fiable es la señal que percibe. La señal sensorial puede ser fiable o no dependiendo del contexto. Se debe tener expectativas respecto de la precisión o la fiabilidad de la señal sensorial, pues si no las hay, no hay forma razonable de evaluar cuánto ajuste necesitan nuestras creencias en el contexto, y la operación bayesiana ayuda justamente a reajustar la probabilidad que le asignamos a las distintas variables. Esto implica que, si bien busca minimizarse el error de predicción, este es necesario pa-

ra saber cuánto ajuste requieren nuestras hipótesis sobre determinado evento o fenómeno.

Lo anterior nos lleva a la cuestión de la evidencia acumulativa (Easwaran 2011), pues la inferencia bayesiana también se aprecia en la consideración de la evidencia acumulativa. En la inferencia bayesiana, la evidencia se suma de manera incremental para actualizar las creencias. De manera similar, en el PP cada iteración de ajuste se basa en la acumulación de experiencias pasadas y en la incorporación de nuevas observaciones. Las inferencias perceptuales que podamos realizar deben ser desarrolladas en función de expectativas relativas a la precisión del error de predicción. Esto nos permitiría entonces en algunos casos, a nivel interno y subjetivo, modelar la precisión del mundo. Las precisiones determinan qué tanta influencia tienen mis hipótesis sobre el mundo. Si se determina que cierta señal no es fiable, entonces las hipótesis guiarán mi comportamiento o razonamiento. Si la señal y los datos que ingresan al sistema son por otro lado fiables, entonces se le da mayor ganancia a ese error de predicción en el momento de revisión de hipótesis. Estos errores ajustan nuestros perceptos sobre el mundo.

La conexión entre el procesamiento predictivo y la inferencia bayesiana revela una sinergia en la forma en que el cerebro aborda la incertidumbre y actualiza sus creencias. La teoría de Friston (principalmente apoyándonos en sus escritos de 2005 y 2010) ofrece una perspectiva unificadora que destaca la naturaleza probabilística del cerebro y su capacidad para adaptarse en un entorno dinámico. Esta perspectiva probabilista puede explicarse en términos bayesianos (Earman 1992; Easwaran 2011; Hartigan 1983) de la forma en que aquí ha sido expuesta.

4. Lucha de probabilidades: formas de reducir el error de predicción

El procesamiento predictivo se encarga de asignar probabilidades a eventos futuros en un intento de predecir fenómenos o situaciones, lo que permite conjeturar hipótesis y de esta manera evitar la incertidumbre de determinado agente. Según Ramsey (1926, como se menciona en Ramsey 1931) la probabilidad debe ser definida como grado de creencia. Las hipótesis que se juegan en PP se confirman bayesianamente, lo que indica que en línea con Ramsey dicha confirmación o desconfirmación de hipótesis se realiza a través de una comparación de los grados de creencia que se tienen en determinado evento (Howson y Urbach 1993).

Mientras más probable sea la evidencia relativa a la hipótesis conjeturada en el procesamiento predictivo, más confirmada (i.e., más grado de confirmación) será esta última (Howson y Urbach 1993, p. 93).

En línea con la regla bayesiana, la probabilidad posterior o resultante de una hipótesis dependerá de la probabilidad anteriormente asignada. Esto sugiere que una hipótesis se confirma cuando su probabilidad posterior excede su probabilidad anterior y mientras mayor sea la diferencia, mayor será la confirmación de ella (Howson y Urbach 2006, p. 100).

Esto es sumamente relevante en el contexto del procesamiento predictivo en donde el cerebro y la mente cometen de forma inevitable errores predictivos y el cerebro debe reajustar el sistema de modelado interno para incorporar nuevas variables en el cálculo probabilístico de la predicción. Aquí es donde inician las luchas de probabilidades internas para reajustar la predicción y evitar los errores predictivos. Ejemplifiquemos esto de la siguiente manera, relacionando el procesamiento predictivo con la regla de Bayes y asignando valores:

Imaginemos un entorno en el que generalmente encontramos animales. Nuestro cerebro ha desarrollado modelos internos para predecir la probabilidad de encontrarnos con ciertos tipos de animales. Caminando por un bosque se escucha un sonido a la distancia. A partir de experiencias previas realizamos una predicción inicial: existe un 70 % de probabilidad de que el sonido haya sido producido por un pájaro, debido a nuestros recuerdos sobre cómo suena un pájaro, un 20 % de que sea un mamífero y un 10 % de que sea otro tipo de animal. Estas últimas dos estimaciones son considerablemente bajas dada nuestra fuerte creencia de que el sonido proviene de un pájaro y que a su vez el sonido no es proveniente de un mamífero u otro.

Al aplicar la regla de Bayes a este ejemplo se deben actualizar estas probabilidades en función de nueva información. Supongamos entonces que observamos un movimiento en los arbustos y logramos identificar cierto patrón de plumaje: la evidencia sugiere fuertemente que el sonido ha sido producto de un pájaro. La regla de Bayes nos permite ajustar las probabilidades iniciales para reflejar esta nueva información. Se presenta a continuación:

Si aplicamos la regla de Bayes

$$P(\text{Sonido de Pájaro}) = \frac{0,95 \cdot 0,70}{0,95 \cdot 0,70 + 0,03 \cdot 0,20 + (0,02 \cdot 0,10)}$$

PROBABILIDAD INICIAL	AJUSTE A PARTIR DE EVIDENCIA
Pájaro (Estimación a partir del sonido emitido por el objeto): 70 %	Pájaro (Estimación dada la verosimilitud entre Patrón de plumaje/sonido/pájaro): 95 %
Mamífero: 20 %	Mamífero: 3 %
Otro: 10 %	Otro: 2 %

Cuadro 1: Ajuste de probabilidades basado en nueva evidencia.

Después de realizar estos cálculos podríamos encontrar una nueva probabilidad ajustada de que el sonido sea en efecto un pájaro. Este proceso refleja cómo la regla de Bayes permite al cerebro actualizar sus creencias iniciales en función de nueva evidencia. Esta nueva probabilidad podría ser, por ejemplo, la siguiente: Pájaro 80 %, Mamífero 15 % y otro animal 5 %. Resultaría finalmente algo así:

PROBABILIDAD INICIAL	AJUSTE A PARTIR DE EVIDENCIA	NUEVA PROBABILIDAD
Pájaro: 70 %	Pájaro: 95 %	Pájaro: 80 %
Mamífero: 20 %	Mamífero: 3 %	Mamífero: 15 %
Otro: 10 %	Otro: 2 %	Otro: 5 %

Cuadro 2: Evolución de las probabilidades tras el ajuste bayesiano.

Este proceso se repite cada vez que el sistema adquiere nueva información y esta pueda ser utilizada para modelar las predicciones y, por lo tanto, conjeturar hipótesis sobre lo que nos rodea. Cada ajuste incremental refleja cómo el cerebro utiliza la regla de Bayes para reducir el error de predicción actualizando sus modelos internos en base a la evidencia acumulativa. La probabilidad final se ajusta continuamente a medida que el cerebro enfrenta nuevas situaciones, mejorando así su capacidad para predecir y adaptarse al entorno. La aplicación de la regla de Bayes destaca cómo el cerebro produce, actualiza y refina las inferencias inductivas utilizadas para conjeturar hipótesis: el cerebro no solo predice, sino que también aprende y ajusta sus creencias en función de la información disponible.

Este enfoque probabilístico y adaptativo es de suma relevancia para reducir el error de predicción y optimizar la capacidad del cerebro para anticipar y comprender su entorno en constante cambio.

5. Consideraciones finales

A lo largo de este escrito hemos hablado de conjeturas e hipótesis, cuestiones que refieren principalmente a los razonamientos inductivos. Las inducciones que se realicen dependen de experiencia previa y las conjunciones de experiencias semejantes del pasado (Pereira 2009, p. 113) y a su vez de la suposición de que el futuro será como el pasado: esto es lo que permite la predicción.

Las predicciones que se desprenden del PP califican como inducciones y razonamientos ampliativos al ofrecer nuevas probabilidades de que determinado evento, suceso o fenómeno resulte verdadero en función de la actualización de evidencias.

No hemos abordado la naturaleza del procesamiento predictivo en términos de experiencia fenomenológica -o experiencia consciente o inconsciente- pues no ha sido el objetivo de este escrito. No obstante, sabemos que amerita un análisis más profundo. Adelantamos que algunos autores llaman ‘inferencia perceptual’ a la predicción inconsciente e ‘inferencia activa’ a la inferencia consciente, es decir, la predicción que se torna consciente al aparecer un precepto sobre el cual analizar probabilísticamente la ocurrencia de un evento.

Además, y en relación con lo anterior, debemos aclarar que las probabilidades o porcentajes en el ejemplo ofrecido están sobresimplificados dada toda la información que supone el ejemplo. El *prior* por ejemplo es un valor que debería aclararse, pero dado el objetivo de este escrito -que no tiene por finalidad realizar demostraciones matemáticas o lógicas- esa información no se entrega. Para tales fines, lo óptimo y pertinente sería utilizar la fórmula completa de Bayes y aquí solo hemos utilizado la versión simplificada.

Por último, debe explicitarse que el enfoque bayesiano sugiere que las probabilidades pueden condicionarse por otras probabilidades en función de eventos previos: este fue el caso del sonido del pájaro en donde el avistamiento de plumaje aumentaba el grado de creencia de que el animal en cuestión fuese un pájaro. En un paradigma bayesiano, y más aún bajo el marco del procesamiento predictivo, la confirmación de las hipótesis resulta ser una cuestión gradual: esto nos llevará al condicionante de que si la probabilidad de evidencia sube entonces

también lo hará la probabilidad de confirmación de la hipótesis. Lo anterior no ocurriría solo en los análisis lógicos-estadísticos sino también en las predicciones internas del cerebro, la mente y los modelos internos del aparato mental. El bayesianismo recoge estos aspectos de no monotonicidad o contextuales y, sin embargo, los encaja en un esquema inferencial probabilístico que refleja cómo modificamos nuestras creencias y aprendemos de la experiencia.

Referencias

- Bayes, T. (1764). An Essay Toward Solving a Problem in the Doctrine of Chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 53 pp. 370-418.
- Clark, A. (2016). *Surfing uncertainty*. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780190217013.001.0001>
- Earman, J. (1992). *Bayes or Bust?: A Critical Examination of Bayesian Confirmation Theory*. MIT Press.
- Easwaran, K. (2011). Bayesianism I: Introduction and arguments in favor. *Philosophy Compass*, 6(5) pp. 312-320. <https://doi.org/10.1111/j.1747-9991.2011.00399.x>
- Friston, K. J. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 360(1456) , pp. 815-836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>
- Friston, K. J. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2) , pp. 127-138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- Hartigan, J. (1983). *Bayes Theory*. Springer series in statistics. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8242-3>
- Hohwy, J. (2013). *The predictive Mind*. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199682737.001.0001>
- Howson, C., & Urbach, P. (1993). Scientific reasoning: the Bayesian approach. *Journal of the Royal Statistical Society*, 156(1), p. 130. <https://doi.org/10.2307/2982875>
- Howson, C., & Urbach, P. (2006). *Scientific reasoning: The Bayesian approach*.

Parr, T., Pezzulo, G., & Friston, K. J. (2022). *Active inference: The Free Energy Principle in Mind, Brain, and Behavior*. MIT Press.

Parzen, E. (1979). *Teoría moderna de probabilidades y sus aplicaciones*.

Pereira, F. (2009). *David Hume: naturaleza, conocimiento y metafísica*.

Ramsey, F.P. (1926). "Truth and Probability" in *The Foundations of Mathematics and other Logical Essays*, Ch. VII, p. 156-198, edited by R.B. Braithwaite, London: Kegan Paul, Trench, Trubner & Co. New York: Harcourt, Brace and Company.