

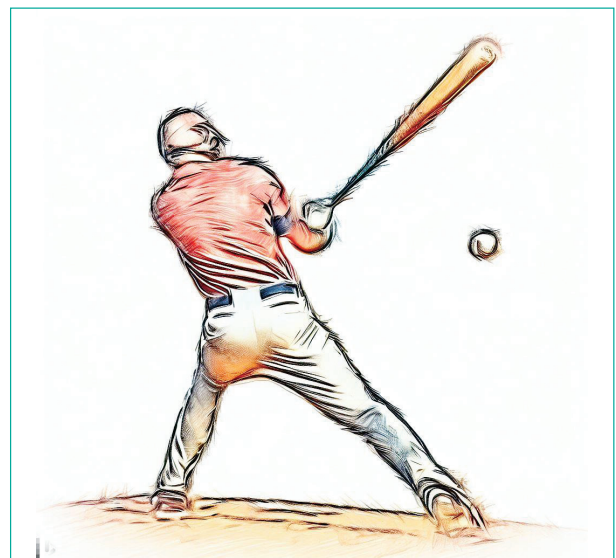
# Procesamiento predictivo en el cerebro

El cerebro humano crea y actualiza modelos mentales para procesar y predecir información de su entorno. En este artículo exploraremos nociones generales sobre el procesamiento predictivo y su posible relevancia en un espectro de fenómenos que van desde el aprendizaje motor hasta distorsiones predictivas asociadas con enfermedades psiquiátricas.

## El cerebro predictivo

Imaginemos estar en un campo de béisbol a punto de batear una bola rápida (véase la Figura 1). Golpearla requiere anticipar el momento y lugar adecuados, lo que involucra estrategias predictivas y prospectivas. Según teorías neurocientíficas, el cerebro usa la inferencia probabilística para minimizar errores de predicción, conciliando así las entradas sensoriales con las expectativas, facilitando la percepción y la acción. Por ejemplo, en el sistema visual, se comparan señales visuales con motoras para detectar discrepancias entre las predicciones internas y la información perceptual. Se plantea que el cerebro puede crear versiones probables de las entradas sensoriales mediante un 'modelo generativo interno', basado en información acumulada del entorno. Así, el cerebro constantemente coteja la información sensorial con sus propias predicciones.

La teoría de modelos internos explica cómo el sistema motor aprende a resolver problemas de aproximación e interceptación considerando sus propiedades



**Figura 1.** En el procesamiento predictivo al golpear una pelota de béisbol, el cerebro genera predicciones, las compara con información sensorial, actualiza su modelo interno y planifica acciones motoras para batear con precisión, integrando la retroalimentación para una mejora continua. Imágenes generadas con tecnología GPT-4 (OpenAI, 2023).



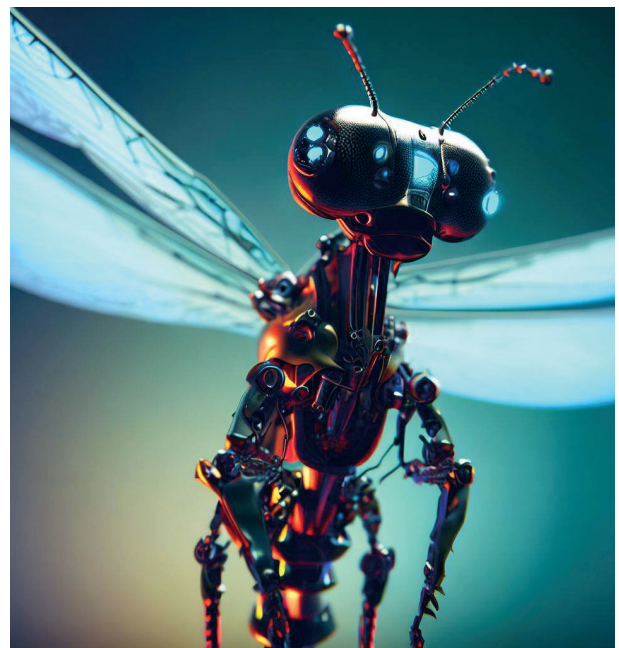
físicas y retardos de procesamiento. De esta forma, nuestros cerebros utilizan su capacidad predictiva en la percepción a distintos niveles, lo que a su vez influye en nuestras respuestas a estímulos futuros. El procesamiento predictivo tiene aplicaciones en la visión, el control motor, el lenguaje y la robótica. En este texto, adoptaré un enfoque mecanicista, sin abordar cuestiones filosóficas; aunque estos temas generan amplios debates en filosofía y ciencia cognitiva, aquí nos centraremos en la función cerebral.

### ■ Procesamiento y codificación predictiva

■ Actividades cotidianas como jugar deportes o conducir implican la interacción con objetos en movimiento. Se ha propuesto que nuestro cerebro implementa un ‘modelo interno’ para guiar la conducta en entornos dinámicos. El procesamiento predictivo es la capacidad cerebral de anticipar resultados perceptuales de movimientos voluntarios, crucial para interactuar con objetos en movimiento. Vincula la función cerebral con la predicción sensorial de nuestras acciones. La sensación de agencia también se relaciona con la previsibilidad de nuestras acciones y sus consecuencias. Para diferenciar la retroalimentación propia de la externa, comparamos nuestras órdenes motoras con los estímulos visuales entrantes. Aquí las ‘señales de error’ generadas por los sistemas motores se suprimen por la ‘propiocepción’. De esta forma, la percepción equilibra las entradas sensoriales con las predicciones a distintas escalas espaciales y temporales. Esta visión integral sostiene que la percepción es un *proceso inferencial* (es decir, que llega a conclusiones utilizando la acumulación de evidencia), que influye en nuestras acciones tanto directa como indirectamente. Generamos predicciones ‘en cascada’ para guiar comandos motores y reducir errores predictivos subsecuentes. Estas interacciones influyen en nuestro pensamiento, predicciones y acciones, pero debemos ser cautelosos y críticos al atribuir funciones humanas al cerebro.

La codificación predictiva usa modelos internos para predecir cambios en las entradas sensoriales. De alguna forma, estos modelos simulan el entorno, permitiendo predicciones sensoriales. Mediante la

codificación predictiva, el cerebro reduce la ambigüedad e incertidumbre actualizando modelos para predicciones más precisas conforme cambian las entradas sensoriales. Bajo esta perspectiva, las cortezas sensoriales primarias de mamíferos emplean la codificación predictiva. Grupos neuronales calculan las discrepancias entre las entradas sensoriales y las predicciones, lo que produce fuertes respuestas ante estímulos sorprendidos. En el sistema visual, por ejemplo, la retina transforma los patrones lumínicos y, posteriormente, el cerebro los procesa en una cascada de interacciones, con un sistema de retroalimentación que anticipa la información de niveles inferiores. Los errores de predicción generan cambios en las representaciones probabilísticas del nivel superior, balanceando la inferencia perceptual rápida (véase la Figura 2). La codificación predictiva, la memoria de corto plazo y la inferencia bayesiana sugieren que el cerebro usa un modelo interno para anticipar información sensorial basada en experiencias y movimientos pasados. La codificación predictiva podría ser un procesamiento fun-



**Figura 2.** Robots libélula utilizan procesamiento predictivo para mejorar sus sistemas de navegación. Grupos de investigación trabajan activamente en el desarrollo de algoritmos de procesamiento predictivo, como los que emplean arquitectura GPT. Estos algoritmos permiten anticipar cambios externos, lo que da como resultado capacidades de respuesta más eficientes y adaptables.

damental en la corteza cerebral, y se ha demostrado su viabilidad biológica mediante algoritmos de inteligencia artificial.

### Implementación de procesamiento predictivo a nivel de circuitos neuronales

La corteza cerebral desempeña una variedad de procesos cognitivos y presenta una estructura celular similar en distintas áreas. Se organiza en capas y módulos comunicados por patrones específicos de conectividad entre grupos de neuronas con fenotipos particulares. Esta arquitectura, presente en muchas áreas, sugiere homología serial: estructuras homólogas comparten células y conexiones, desarrollo, genes y patrones de actividad. El ‘microcircuito canónico’, replicado en distintas áreas y especies, sugiere un mecanismo común para procesar información sensorial, control motor y procesos cognitivos. ¿Participan los circuitos corticales en la codificación predictiva? Según la idea del ‘microcircuito canónico’, el cerebro usa cálculos neuronales básicos para operaciones similares en diversas áreas y modalidades perceptuales. En la teoría de codificación predictiva, un modelo generativo predice cómo propiedades ambientales generan entradas sensoriales específicas.

A nivel fisiológico, se ha registrado actividad neuronal que concuerda con respuestas a errores de predicción. Modelos de codificación predictiva señalan que cada nivel sensorial tiene unidades de representación (neuronas que codifican probabilidad de estímulos, y hacen predicciones al nivel inferior) y unidades de error predictivo (neuronas que codifican discrepancias entre evidencia y predicciones, y envían errores de predicción al siguiente nivel superior). Estas señales de error predictivo se han detectado en capas superiores de la corteza visual primaria, y también en inferiores, aunque son más comunes en las superiores. Ambos tipos de neuronas responden a propiedades específicas de los estímulos sensoriales, y su actividad se modula por la atención, sorpresa y expectativa del individuo.

A nivel sináptico, se cree que el error de predicción se origina en la diferencia entre entradas

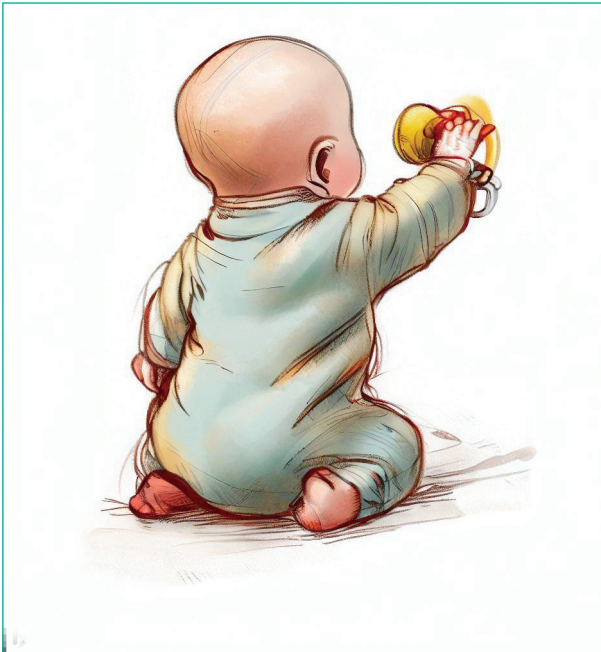


**Figura 3.** La imagen representa un bosquejo de un circuito cortical compuesto por neuronas piramidales (excitadoras) e interneuronas (inhibidoras) que interactúan sinápticamente. Esta interacción facilita el procesamiento de información y comunicación dentro de la corteza cerebral, el cual es crucial para las funciones cognitivas, la percepción y la acción.

sinápticas inhibitoras y excitadoras. Estas dos señales se podrían integrar en neuronas que generan una ‘representación interna’. Neuromoduladores como la acetilcolina influyen en las entradas sensoriales y en señales internas como la expectativa y la incertidumbre. Por otro lado, se cree que la dopamina participa en el cálculo de errores de predicción asociados a la obtención de recompensa, mientras que la noradrenalina se asocia con la variabilidad de las respuestas neuronales y las oscilaciones cerebrales. Estos neuromoduladores influyen en el aprendizaje (véase la Figura 3).

### Aprendiendo a predecir

Desde temprana edad desarrollamos la capacidad de predecir y ajustar nuestro comportamiento basándonos en los errores que cometemos (véase la Figura 4). Influidas por la experiencia, estas respuestas predictivas se codifican en neuronas corticales. Por ejemplo, la corteza visual anticipa estímulos visuales vía la experiencia, asociando entradas visuales con salidas motoras. Los errores de predicción, que sur-



**Figura 4.** Aprendiendo a predecir. El procesamiento predictivo en un bebé le permite generar predicciones sobre la ubicación y movimiento de un objeto, guiando su planificación y ejecución motora para un alcance exitoso. En tal proceso la retroalimentación sensorial de la interacción se emplea para mejorar futuras predicciones y el control motor.

gen cuando existe una discrepancia entre la información sensorial entrante y la esperada, se consideran señales críticas que promueven la plasticidad sináptica a nivel celular. Es decir, estos errores predictivos coactivan sistemas de neuromodulación que influyen en la plasticidad sináptica.

La percepción no es simplemente un reflejo pasivo del mundo externo, sino más bien una construcción activa en la que contrastamos la evidencia sensorial con conocimiento almacenado. El cerebro evolucionó para enfrentar incertidumbre, ruido y ambigüedad diaria. Por tanto, resulta crucial investigar cómo nuestro sistema predictivo procesa los estímulos sensoriales en contextos con variabilidad controlada. Los modelos internos representan la percepción como inferencia probabilística, donde las entradas sensoriales comandan la generación de predicciones.

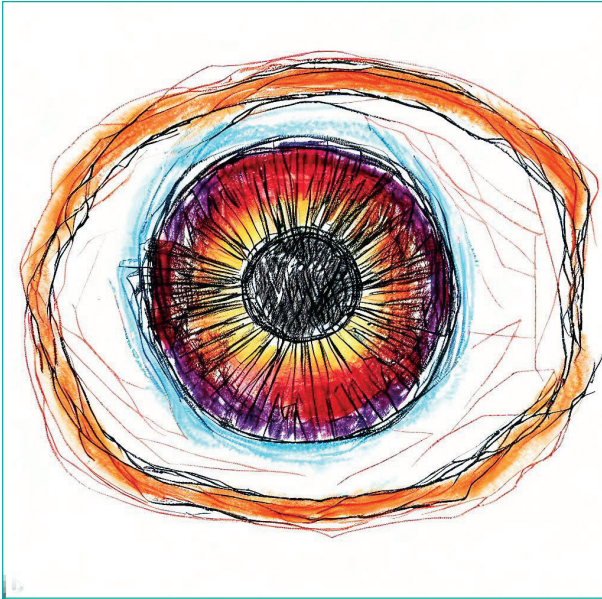
Las teorías de codificación predictiva sugieren que las representaciones neuronales podrían codificar predicciones usando distribuciones de probabilidad. Es decir, el cerebro podría representar la información externa probabilísticamente, considerando

múltiples posibilidades para identificar la mejor representación de un evento sensorial dado.

Representar el mundo en el cerebro implica un gasto energético. En situaciones en las que las predicciones y las entradas sensoriales no coinciden, el consumo de energía del cerebro aumenta. Sin embargo, el ‘principio de energía libre’ propone que los procesos cerebrales se adaptan para minimizar el consumo energético. En el contexto de las interacciones cerebro-entorno, esta minimización podría llevar a reducir el error de predicción, influyendo en el reconocimiento, inferencia, acciones y aprendizaje. Este principio desafía las clasificaciones convencionales y sus implicaciones han generado un intenso debate en la comunidad científica. Su enfoque único y disruptivo lo convierten en un campo de estudio apasionante y controvertido.

#### ■ **Disfunción en la predicción**

■ Las discrepancias entre nuestras predicciones y la realidad son frecuentes, y la habilidad de los seres humanos para detectar y reaccionar a estas discrepancias varía significativamente. Esto tiene implicaciones relevantes en el campo de las neurociencias y de la salud mental. Por ejemplo, existen fallas en la predicción que están vinculadas a problemas de aprendizaje y trastornos psiquiátricos (véase la Figura 5). La amplia participación de diversas regiones cerebrales en estos procesos conduce a manifestaciones específicas en la actividad electroencefalográfica, motora y visuomotora. Esto permite la distinción entre poblaciones clínicas y personas neurológicamente sanas. Asimismo, antipsicóticos como la clozapina impactan en el procesamiento de errores de predicción. La ketamina, un anestésico con efectos antidepresivos, produce efectos alucinógenos al cambiar la señal de error de predicción; afecta las corrientes excitadoras, creando un sesgo en la predicción y magnificando la importancia de los eventos sensoriales, lo que podría llevar a creencias similares a los delirios. Asimismo, los efectos de drogas como el LSD, anfetaminas (agonistas de dopamina), alucinógenos serotoninérgicos y cannabis podrían explicarse mediante cambios en el procesamiento predictivo. La esquizo-



**Figura 5.** Disfunción en el procesamiento predictivo. Las fallas en el procesamiento predictivo podrían contribuir a déficits cognitivos, perceptuales y sociales observados en algunos trastornos psiquiátricos.

frenia y el trastorno del espectro autista podrían ser extremos de desequilibrio en donde las predicciones impactan excesiva o insuficientemente en la representación interna del mundo. Por ello, comprender los síntomas de los trastornos psiquiátricos requiere explorar posibles anomalías en la formación y ponderación de los errores de predicción. La codificación predictiva proporciona una base sólida para explicar cambios complejos en el aprendizaje y la experiencia, combinando señales sensoriales y expectativas mediante el uso de errores de predicción.

## Conclusión

Predecir el futuro cercano podría ser una de las ventajas de contar con un cerebro. Argumenté que la percepción sirve para calibrar nuestras predicciones internas con información externa. Parte de los recursos cerebrales se usan para procesar errores entre señales perceptuales y predicciones. Estos errores actualizan el modelo interno, dotando de estructura y significado a la percepción y también optimizan

la codificación cerebral: el cerebro se autoorganiza para minimizar dichos errores, ajustando sus predicciones y movimientos (como sucede en la percepción activa). Explorar cómo se usan los errores predictivos es clave para entender la percepción y el aprendizaje, además de que resulta esencial llevar a cabo más investigaciones en esta dirección para abordar problemas de salud mental y orientar el desarrollo de terapias efectivas.

## Mario Treviño Villegas

Instituto de Neurociencias, Universidad de Guadalajara.  
mario.trevino@academicos.udg.mx

## Referencias específicas

- Srinivasan, M. V., S. B. Laughlin y A. Dubs (1982), "Predictive Coding: A Fresh View of Inhibition in the Retina", *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 216:427-459. Disponible en: <doi.org/10.1098/rspb.1982.0085>.
- Wolpert, D. M., Z. Ghahramani y M. I. Jordan (1995), "An Internal Model for Sensorimotor Integration", *Science*, 269:1880-1882. Disponible en: <doi.org/10.1126/science.7569931>.
- Kawato, M. (1999), "Internal Models for Motor Control and Trajectory Planning", *Current Opinion in Neurobiology*, 9:718-727. Disponible en: <doi.org/10.1016/s0959-4388(99)00028-8>.
- Friston, K. (2005), "A Theory of Cortical Responses", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360:815-836. Disponible en: <doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>.
- Clark, A. (2013), "Whatever Next? Predictive Brains, Situated Agents, and the Future of Cognitive Science", *Behavioral and Brain Sciences*, 36:181-204. Disponible en: <doi.org/10.1017/S0140525X12000477>.
- Heeger, D. J. (2017), "Theory of Cortical Function", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 114:1773-1782. Disponible en: <doi.org/10.1073/pnas.1619788114>.
- Keller, G. B. y T. D. Mrsic-Flogel (2018), "Predictive Processing: A Canonical Cortical Computation", *Neuron*, 100:424-435. Disponible en: <doi.org/10.1016/j.neuron.2018.10.003>.