INTELETICA 3(6)(2026), 1-14
Revista de Inteligencia Artificial, Ética y Sociedad

INTELETICA

https://inteletica.iberamia.org/

La formación de la observación científica ante la IA: la atrofia perceptiva como concepto

The Formation of Scientific Observation in the Age of AI: Perceptual Atrophy as a Concept

José Luis Granados Mateo [1]
[1] Departamento de Filosofía, Facultad de Educación, Filosofía y Antropología, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), San Sebastián, España.
[1] joseluis.granados@ehu.eus; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5881-6163

Abstract The educational value of artificial intelligence depends, in part, on how it reorganizes learners' opportunities to observe, intervene, and question scientific representations. This article develops a conceptual argument concerning perceptual atrophy, understood as the possible weakening of acquired capacities to discriminate features and anomalies relevant to a scientific practice. This process is distinguished from insufficient initial development and from adaptive transformations of expertise. Drawing on postphenomenology, embodied perception, and the philosophy of experimentation, we compare three configurations: model-based simulation, machine-learning analysis of empirical records, and structural prediction, exemplified by AlphaFold2. These cases serve a contrasting function; they are not equivalent forms of AI. From the educational goal of accountable observation, we reconstruct three normative criteria: material resistance, epistemic openness, and the possibility of surprise. Counterexamples clarify their distinct functions. Research on virtual laboratories calls for a conditional assessment and challenges any universal priority assigned to physical experience. We propose perceptual calibration, examination of representational provenance, and hybrid inquiry as theoretically motivated strategies that require empirical validation. The contribution is a framework for examining the distribution of perceptual agency; it does not establish that AI necessarily impairs scientific learning.

Resumen El valor educativo de la inteligencia artificial depende, en parte, de cómo reorganiza las oportunidades de observar, intervenir y cuestionar las representaciones científicas. En este artículo desarrollamos un argumento conceptual sobre la atrofia perceptiva, entendida como el posible debilitamiento de capacidades adquiridas para discriminar rasgos y anomalías relevantes en una práctica científica. Distinguimos dicho proceso del desarrollo inicial insuficiente y de la transformación adaptativa de las destrezas. Desde la postfenomenología, la percepción encarnada y la filosofía de la experimentación, comparamos tres configuraciones: la simulación basada en modelos, el análisis de registros empíricos mediante aprendizaje automático y la predicción estructural, ejemplificada por AlphaFold2. Se trata de casos contrastantes, no de modalidades equivalentes de IA. A partir del objetivo formativo de una observación responsable, reconstruimos tres criterios normativos: resistencia material, apertura epistémica y posibilidad de sorpresa. El recurso a contraejemplos permite precisar sus distintas funciones. La investigación sobre laboratorios virtuales exige una evaluación condicional y cuestiona la prioridad universal de la experiencia física. Proponemos la calibración perceptiva, el examen de la procedencia de las representaciones y la indagación híbrida como estrategias teóricamente motivadas, cuya eficacia requiere validación empírica. Nuestra contribución consiste en un marco para examinar la distribución de la agencia perceptiva; no demuestra que la IA deteriore necesariamente el aprendizaje científico.

Palabras clave: atrofia perceptiva, observación científica, postfenomenología, educación STEM, inteligencia artificial, mediación tecnológica.

Keywords: perceptual atrophy, scientific observation, postphenomenology, STEM education, artificial intelligence, technological mediation.

ISSN: 3020-7444
© Los Autores. Open Access, bajo Licencia Creative Commons (CC BY-NC).

1 Introducción

Una herramienta puede mejorar el resultado de una tarea científica y, al mismo tiempo, modificar las oportunidades de aprender a realizarla. Conviene tener presente esta posibilidad cuando la educación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) incorpora simulaciones, clasificadores y modelos predictivos. La comparación entre dispositivos físicos y pantallas no basta para dilucidar el problema. Una interfaz puede permitir la intervención en un experimento remoto; una práctica presencial, en cambio, puede limitarse a reproducir un resultado conocido. Por ello, las preguntas pertinentes son qué aprende a distinguir el estudiante, qué decisiones conserva y de qué recursos dispone para cuestionar lo que se le presenta como evidencia.

Por descarga cognitiva se entiende el empleo de acciones y recursos externos para modificar las exigencias de procesamiento de una tarea. Tal descarga no implica, por definición, una pérdida de capacidad [1]. Otro tanto cabe precisar respecto de la automatización, cuya investigación distingue el uso apropiado de los sistemas de la confianza excesiva y del rechazo injustificado [2]. En el debate educativo reciente, Wulff y Kubsch advierten contra la identificación del rendimiento asistido con el aprendizaje [3]; Klein y Klein proponen la noción de mente «ahuecada» como marco teórico para abordar la dependencia y los conocimientos fundamentales [4]; Rivera-Novoa y Duarte Arias examinan, desde la cognición extendida, los usos sustitutivos y complementarios de la IA generativa [5]. Estos trabajos ya consideran la participación activa del sujeto, y algunos incorporan dimensiones corporales. No cabe, por tanto, afirmar que la percepción esté enteramente ausente de la literatura.

Nuestra contribución es más delimitada. Se trata de explicitar qué podría perderse cuando una mediación reduce reiteradamente el ejercicio de discriminaciones perceptivas relevantes, así como de evaluar dicha reducción sin presuponer que toda externalización es perjudicial. Denominaremos atrofia perceptiva al debilitamiento de capacidades previamente adquiridas para advertir rasgos, variaciones o anomalías que importan en una práctica científica. Cuando los estudiantes todavía no han desarrollado esas capacidades, hablaremos de desarrollo perceptivo insuficiente. Ambas posibilidades pueden compartir condiciones educativas; sin embargo, las evidencias necesarias para establecer una y otra son distintas.

La tesis que mantendremos es condicional. Si una secuencia formativa desplaza de manera persistente el ejercicio de una capacidad perceptiva pertinente, no proporciona oportunidades equivalentes de aprendizaje y evalúa únicamente el rendimiento asistido, puede ocultar el deterioro o la adquisición insuficiente de dicha capacidad. No afirmamos que estas condiciones concurran en toda educación con IA, ni que produzcan necesariamente ese resultado. Proponemos razones para investigarlas y criterios para diseñar alternativas. Conforme a este planteamiento, la unidad de evaluación será la configuración integrada por el estudiante, la tarea, el instrumento, los datos, la intervención docente y la evaluación. El artefacto aislado no basta como unidad de análisis.

Un riesgo específico consiste en presentar resultados separados de sus condiciones de producción y de las prácticas que permiten corregirlos. No afirmamos con ello una ausencia ontológica de mundo en lo digital: los ordenadores son materiales, las representaciones pueden sustentar conocimiento y toda observación científica está mediada. El problema es pedagógico: aprender a reconocer una salida sin aprender a interrogar su procedencia, sus límites o su relación con el sistema estudiado.

2 Método y delimitación del análisis

2.1 Tipo de investigación y selección de los casos

La investigación que desarrollamos es filosófica, de carácter conceptual y normativo. La reconstrucción fenomenológica tiene por objeto explicitar posibilidades de experiencia y acción en situaciones de observación; no procede de entrevistas, observaciones de aula ni vivencias recogidas por el autor. Por su parte, el diagnóstico postfenomenológico examina cómo los instrumentos distribuyen lo visible y lo practicable, conforme a la atención que Ihde presta a las relaciones humano–tecnología–mundo [6]. La filosofía de la intervención y de los sistemas experimentales aporta recursos para examinar la corrección empírica y la producción de preguntas [7], [8]. Las conclusiones han de entenderse, por tanto, como argumentos revisables, no como estimaciones de prevalencia ni como resultados causales.

La selección de los casos es intencional y responde a un criterio de contraste epistemológico. Comparamos tres configuraciones que difieren en la relación entre la entrada, la transformación y el objeto al que se refiere la salida. Una simulación produce consecuencias de un modelo bajo condiciones elegidas; un clasificador transforma

registros que pueden proceder de mediciones del sistema estudiado; un predictor estructural estima propiedades que no se han medido directamente en la instancia examinada. PhET sirve como referencia de simulación educativa; el clasificador de imágenes constituye un caso-tipo construido; AlphaFold2 aporta un caso documentado de predicción. Buscamos así una variación pertinente para el argumento. No pretendemos ofrecer representatividad estadística, exhaustividad tecnológica ni una clasificación de las herramientas más utilizadas.

Antes de proseguir, conviene precisar dos términos. Por «mediación algorítmica» entenderemos la intervención de procedimientos computacionales en la presentación, transformación o interpretación de información. Emplearemos «IA» con un alcance operativo más restringido: sistemas basados en modelos aprendidos de datos, cuando realizan tareas de clasificación, predicción o generación. Esta delimitación no pretende ser una definición general que excluya otras tradiciones de IA. Una simulación de ecuaciones explícitas no se convierte en IA por ser interactiva ni por producir animaciones. La incluimos con una finalidad comparativa: distinguir los riesgos compartidos por las mediaciones computacionales de los problemas específicos del aprendizaje automático. Asimismo, un laboratorio remoto permite actuar a distancia sobre equipos físicos y, por ello, no equivale a una simulación.

El corpus reúne una selección argumentativa de obras sobre mediación técnica, percepción, experimentación y computación, contrastada con investigaciones educativas y documentación técnica. No constituye una revisión sistemática ni un inventario completo de la literatura. Para evitar un contraste unilateral, incorporamos estudios sobre los beneficios de los laboratorios virtuales y la transferencia al uso de equipos físicos [9], [10], [11]. Conviene distinguir las funciones de estas fuentes: los textos filosóficos aportan distinciones; los trabajos empíricos delimitan la plausibilidad de los escenarios; la documentación de AlphaFold2 precisa qué produce el sistema. Ninguna de estas funciones permite, por sí sola, inferir atrofia perceptiva.

2.2 Procedimiento y fundamento normativo

El análisis comprende cuatro operaciones, cada una de las cuales puede discutirse por separado. En primer lugar, reconstruimos qué se introduce en cada configuración, qué transformación se realiza y qué relación mantiene la salida con el objeto estudiado. En segundo lugar, identificamos las acciones perceptivas y de comprobación que la actividad permite, desplaza o excluye de la tarea. En tercer lugar, examinamos cómo podría afectar esa distribución al aprendizaje, distinguiendo las propiedades del dispositivo de las decisiones curriculares. Por último, sometemos el diagnóstico a contraejemplos: simulaciones que favorecen la transferencia, laboratorios físicos cerrados y sistemas opacos cuyo uso admite una supervisión justificada.

Los criterios normativos que propondremos no se deducen automáticamente de la descripción de los instrumentos, ni se atribuyen como tríada a un autor previo. Los construimos mediante un argumento de adecuación entre fines y medios. Partimos de la siguiente premisa normativa: la formación científica debe permitir al estudiante participar responsablemente en la producción y revisión de evidencia relevante para su disciplina. De ella se deriva una exigencia de diseño: conservar oportunidades para reconocer discrepancias, revisar interpretaciones y responder a información que contradiga las expectativas. Dicha exigencia puede desglosarse en tres preguntas: ¿qué constriñe empíricamente la representación?, ¿qué puede revisar el estudiante?, ¿qué discrepancias puede encontrar y advertir? A estas preguntas corresponden, respectivamente, la resistencia material, la apertura epistémica y la posibilidad de sorpresa.

Las tradiciones de la intervención, la mediación técnica y los sistemas experimentales justifican la pertinencia de estas preguntas. No prueban, sin embargo, que la tríada sea exhaustiva ni que sus componentes sean estadísticamente independientes. Su utilidad habrá de juzgarse por su capacidad para discriminar configuraciones y orientar contrastes. Evitamos así la circularidad que supondría definir como atrofiante cualquier mediación digital y condenarla luego en virtud de esa misma definición. La disminución de oportunidades es un factor de riesgo hipotético; el deterioro de una capacidad es un resultado que tendría que medirse de manera independiente.

3 Observar mediante instrumentos

3.1 Percepción encarnada y experiencia científica

Merleau-Ponty sitúa la percepción en la relación corporal con un entorno practicable [12]. Noë desarrolla una concepción activa de la percepción, mientras que Gallagher diferencia las dimensiones corporales que intervienen en la cognición [13], [14]. Estas aproximaciones permiten examinar las condiciones en que se adquiere una discriminación. Enfocar una muestra, advertir una variación del campo visual o ajustar una medición son actividades organizadas por capacidades de acción. De ello no se sigue que todo aprendizaje haya de ser táctil, ni que la interacción computacional carezca de corporalidad. Manejar una visualización y coordinar acciones con una interfaz también puede constituir una práctica perceptiva.

Lo que importa precisar es la especificidad de lo aprendido. Se puede reconocer una forma en una imagen y, al mismo tiempo, no saber distinguir un desenfoque de una modificación de la muestra. A la inversa, cabe manejar con destreza un instrumento y carecer de recursos para interpretar un mapa de incertidumbre. Una capacidad no equivale a la otra; la necesidad de cada una depende de los objetivos formativos. Entendemos, por tanto, la percepción científica como una capacidad situada para discriminar información relevante y orientar acciones. No la concebimos como una facultad sensorial general cuya superioridad pueda atribuirse a una modalidad educativa.

En el análisis de Ihde, las relaciones de encarnación y las relaciones hermenéuticas ponen de relieve distintas formas de incorporar e interpretar los instrumentos [6]. No cabe asignar las primeras al laboratorio físico y las segundas a la pantalla de manera rígida. Un instrumento puede alternar funciones, así como combinar signos y acciones corporales. Desde la perspectiva postfenomenológica, la pregunta es qué amplifica y qué reduce una mediación en una práctica concreta. Una misma tecnología puede facilitar el reconocimiento de ciertos rasgos y dificultar el acceso a otros, sin que dicho balance permanezca estable entre tareas o estudiantes.

3.2 Intervención y producción de representaciones

La distinción de Hacking entre representar e intervenir subraya la función de las operaciones experimentales en la justificación científica [7]. No permite identificar la observación con una recepción pasiva, ni suponer que la simulación carece de toda causalidad. Al ejecutar un programa se interviene en un sistema computacional. Hay que dilucidar, por tanto, si esa intervención alcanza al sistema que se pretende conocer o si explora un modelo de él. La diferencia es pertinente para la validación, aunque por sí sola no establezca una jerarquía entre formas de conocimiento.

La fenomenotecnia de Bachelard pone de relieve la elaboración técnica de los fenómenos científicos [15], [16]. Reconocerla no implica que los instrumentos produzcan arbitrariamente la realidad, ni que todas las representaciones sean equivalentes. La preparación de una muestra y el ajuste de un aparato contribuyen a producir condiciones de observación; los resultados, sin embargo, siguen sujetos a exigencias de control y contraste. Tampoco las imágenes instrumentales hacen transparente por sí mismas su cadena de producción. La selección, el procesamiento y la reconstrucción pueden introducir opacidades anteriores a la IA. Por ello, la procedencia ha de enseñarse: el carácter físico del instrumento no autoriza a darla por supuesta.

Rheinberger distingue las cosas epistémicas, que mantienen abiertas cuestiones de investigación, de las condiciones técnicas relativamente estabilizadas que hacen posible su estudio [8]. Adoptamos esta distinción como recurso analítico para preguntar si una tarea permite convertir un resultado en problema. No presupone que los objetos digitales sean intrínsecamente cerrados. Una estructura predicha puede suscitar experimentos; una muestra material, en cambio, puede quedar subordinada a un protocolo que penalice cualquier desviación del resultado esperado. La apertura depende de cómo se organice la indagación.

3.3 Opacidad y control

Humphreys examina la ampliación de las capacidades humanas por la ciencia computacional y los problemas de accesibilidad epistémica que esta plantea [17]. Burrell distingue, a su vez, las opacidades debidas al secreto, a la falta de conocimientos técnicos y a las características y la escala del aprendizaje automático [18]. Estas diferencias impiden considerar la caja negra como una propiedad uniforme o exclusiva de las redes profundas. Un modelo sencillo puede resultar incomprensible para un estudiante; un sistema complejo puede proporcionar documentación, pruebas y medidas de incertidumbre que permitan una supervisión parcial.

Denominaremos «opacidad pedagógica» a una condición adicional de la actividad: la exclusión del aprendizaje de información pertinente que podría trabajarse. Reducirla no exige que cada estudiante reconstruya todos los cálculos. Puede exigir que identifique la tarea del modelo, la procedencia de los datos, los límites de uso y el tipo de comprobación disponible. La transparencia completa no es necesaria para una confianza justificada; tampoco la publicación del código basta para garantizar comprensión o fiabilidad. Desde el punto de vista formativo, lo que hay que precisar es qué responsabilidades puede asumir el estudiante con los recursos de que efectivamente dispone.

4 Tres configuraciones contrastantes

4.1 Simulación de laboratorio

Una simulación como las del proyecto PhET permite explorar relaciones entre variables y visualizar aspectos de un modelo que no son perceptibles en una práctica ordinaria. Examinaremos esta función sin clasificar el simulador como IA. Modificar una resistencia ideal y observar los cambios en un circuito simulado puede ayudar a reconocer relaciones relevantes, sin tener que afrontar simultáneamente las dificultades del montaje físico. La idealización constituye, por tanto, un recurso didáctico legítimo, siempre que se explicite su alcance.

La epistemología de la simulación de Winsberg muestra que el conocimiento computacional exige prácticas de justificación y no se limita a ilustrar una teoría [19]. Ejecutar un modelo difiere de experimentar sobre su sistema objetivo; esa diferencia no priva a la simulación de contenido epistemológico. Para nuestro análisis educativo importa determinar qué supuestos y procedimientos de contraste se hacen accesibles al estudiante, y cuáles quedan fuera de su tarea.

El riesgo surge cuando la secuencia da por adquiridas capacidades que no ha puesto en juego. Una actividad puede enseñar relaciones entre magnitudes sin enseñar a localizar un mal contacto ni a reconocer una medición inestable. Esto no obliga a incorporar todas las contingencias materiales: la selección es inevitable. Obliga, en cambio, a precisar qué se entiende por «comprender un circuito» antes de considerar intercambiables dos prácticas. Un simulador que incorpore fallos deliberados puede entrenar algunas discriminaciones; su transferencia a otras situaciones habrá de comprobarse.

La revisión de de Jong, Linn y Zacharia identifica posibilidades complementarias en los laboratorios físicos y virtuales [9]. Rutten, van Joolingen y van der Veen muestran que las simulaciones pueden favorecer el aprendizaje, subrayando la importancia de los apoyos y de la integración didáctica [10]. Para nuestro argumento, el estudio de Finkelstein y colaboradores resulta particularmente incisivo: en una actividad sobre circuitos, el grupo que utilizó la simulación obtuvo mejores resultados tanto en las medidas conceptuales como en tareas posteriores con un circuito real [11]. Este resultado contradice una regla universal de precedencia de la experiencia física. No demuestra que cualquier simulación permita transferir todas las destrezas materiales, pero sí obliga a comprobar qué experiencias requiere cada capacidad.

Lisborg y Tafdrup analizan las diferencias corporales y multisensoriales entre laboratorios físicos y virtuales, así como la necesidad de estrategias que conecten ambas prácticas [20]. Su trabajo permite examinar transformaciones de la experiencia, pero no constituye una medición longitudinal de atrofia. Conviene añadir otra precisión: la finitud de un modelo no elimina toda sorpresa. Un sistema determinista puede producir resultados inesperados para quien lo utiliza. La imprevisibilidad relativa al observador no equivale al indeterminismo ontológico.

4.2 Análisis de registros mediante aprendizaje automático

Consideremos, como caso-tipo, una actividad en la que un clasificador identifica regiones relevantes de imágenes obtenidas instrumentalmente. La salida mantiene una relación mediada con los registros de la muestra. El modelo puede ayudar a advertir regularidades difíciles de detectar; también puede desplazar el trabajo perceptivo si únicamente entrega etiquetas. La descripción de su arquitectura no permite decidir entre estas posibilidades. Para ello hay que examinar si el estudiante conserva el acceso a las imágenes, puede inspeccionar errores y dispone de ocasiones para contrastar las clasificaciones.

Podemos reconstruir con precisión la inferencia de riesgo. Cuando la tarea exige aceptar una etiqueta sin examinar el registro, disminuye la práctica de discriminar los rasgos que la justifican o la contradicen. Si esta organización se repite, el rendimiento del sistema puede encubrir una capacidad humana insuficiente. Estamos ante una hipótesis sobre las oportunidades y el aprendizaje, que el mero uso de la clasificación automática no permite diagnosticar. Un entrenamiento basado en la comparación de etiquetas, registros y errores puede producir el efecto contrario: desarrollar nuevas habilidades de lectura crítica.

Conviene distinguir la incertidumbre predictiva, la calidad de las etiquetas y el cambio entre las condiciones de entrenamiento y las de uso. Examinar un conjunto de prueba ayuda a valorar el rendimiento en determinadas condiciones; no revela todos los mecanismos internos ni garantiza la transferencia a otra población de datos. Desde el punto de vista pedagógico, importa que el estudiante pueda expresar qué se ha comprobado y qué permanece abierto. La clasificación humana tampoco debe erigirse automáticamente en patrón de verdad. Resolver el desacuerdo requiere un procedimiento de adjudicación o una fuente adicional de evidencia.

El estudio de Lim y colaboradores examina las respuestas de estudiantes de ingeniería a sugerencias de IA durante tareas de ensamblaje, así como procesos de reflexión sociotécnica [21]. Aporta evidencia situada sobre la intervención de la mediación y de la cultura pedagógica en la experiencia. No estudia el clasificador de nuestro ejemplo ni demuestra deterioro perceptivo. Su pertinencia para este análisis consiste en justificar el examen de la configuración completa y en mostrar por qué los efectos de una actividad educativa no deben atribuirse al algoritmo considerado aisladamente.

4.3 Predicción estructural y visualización de AlphaFold2

Tomamos AlphaFold2 como caso de predicción de estructura proteica mediante aprendizaje automático, conforme a la versión descrita por Jumper y colaboradores [22]. A partir de una secuencia de aminoácidos y de la información que utiliza su procedimiento, el sistema produce un modelo estructural acompañado de estimaciones de confianza. La visualización tridimensional representa las coordenadas predichas. No es una micrografía ni una imagen obtenida directamente de la proteína particular que se muestra. Esta precisión permite distinguir la predicción estructural de la generación de ilustraciones a partir de texto.

La distinción anterior no contrapone datos «puros» e invenciones arbitrarias. AlphaFold2 se desarrolló y evaluó en relación con información estructural empírica, y su desempeño se examinó en CASP14 [22]. Por su parte, una estructura experimental también implica modelización e interpretación. Lo que hay que distinguir es la procedencia de la evidencia y el tipo de inferencia que sustenta cada representación. En una actividad educativa, mostrar una predicción, contrastarla con una estructura determinada experimentalmente y afirmar que una estructura particular ha quedado establecida son operaciones que han de diferenciarse.

La documentación de EMBL-EBI explica dos medidas de confianza de AlphaFold2: pLDDT, relativa a la confianza local, y PAE, referida a la posición relativa de regiones [23]. Una representación visual puede hacer accesibles estas diferencias. El riesgo reside en que la presentación docente omita esos recursos, o en que el estudiante no aprenda a interpretarlos; no en que el sistema carezca necesariamente de medios para expresar incertidumbre. Conviene insistir en la distinción: la nitidez gráfica no permite inferir precisión estructural, y una puntuación de confianza no equivale, por sí sola, a la validación experimental de cada afirmación biológica.

Una misma predicción puede presentarse como respuesta que hay que memorizar o como punto de partida para preguntar qué regiones admiten una interpretación y qué comprobaciones adicionales serían pertinentes. AlphaFold2 no constituye, por tanto, el último peldaño de una escala que conduzca inevitablemente a una desconexión cada vez mayor del mundo. Su interés para este análisis radica en que permite enseñar a distinguir la salida computacional, la representación visual y el fundamento probatorio. No presuponemos que su uso esté generalizado en las aulas, ni evaluamos otras versiones de AlphaFold.

4.4 Funciones de mediación

Las tres configuraciones anteriores han de distinguirse de tres funciones pedagógicas que pueden coexistir. Diremos que una mediación es sustitutiva respecto de una actividad cuando el sistema realiza una operación cuyo ejercicio se retira al estudiante; amplificadora, cuando hace posibles discriminaciones o acciones antes inaccesibles; y metaperceptiva, cuando convierte las condiciones de producción de lo percibido en objeto de examen. Esta terminología tiene una finalidad analítica y no constituye una taxonomía validada. La sustitución,

además, puede ser conveniente: automatizar una operación secundaria puede liberar recursos para otra que sea el objetivo del aprendizaje. Para valorarla hay que especificar qué se sustituye y con qué finalidad.

No hay una correspondencia biunívoca entre estas funciones y la simulación, la clasificación y la predicción. Un clasificador puede ampliar la visión y, simultáneamente, sustituir una decisión. Una simulación puede hacer posibles contrastes metaperceptivos. Por ello, la evaluación ha de atender al conjunto de la secuencia y a las oportunidades compensatorias que proporciona, incluidas las actividades remotas, colaborativas o apoyadas en tecnologías de accesibilidad.

5 Atrofia perceptiva y criterios normativos

5.1 Definición y conceptos próximos

Proponemos la atrofia perceptiva como categoría de deterioro relativo a una práctica. Consiste en la disminución de una capacidad previamente adquirida para discriminar indicios relevantes y responder a ellos de manera apropiada. No designa una lesión, una pérdida general de sensibilidad ni un síndrome demostrado. La hipótesis educativa atribuye dicho deterioro, bajo ciertas condiciones, a la retirada reiterada de oportunidades de ejercicio y corrección. Esta delimitación es decisiva: sin una medida inicial, una menor competencia puede deberse a un aprendizaje insuficiente, a diferencias previas o a un desajuste entre la tarea y la formación. Por sí sola, no demuestra una pérdida.

El concepto no exige que el sujeto ignore su dificultad. La falta de conciencia puede acompañar a la atrofia, pero también puede haber autocrítica y reconocimiento de la pérdida. Tampoco presupone que las capacidades perceptivas sean ajenas a las destrezas: la atrofia puede constituir una dimensión del deskilling. Su especificidad analítica consiste en atender a lo que llega a advertirse como rasgo significativo antes del juicio explícito y durante este. Los trabajos de Polanyi sobre el conocimiento personal permiten reconocer la función de capacidades aprendidas que no se agotan en reglas verbalizadas [24]. No autorizan a concluir que los algoritmos sean incapaces de detectar anomalías.

La Tabla 1 compara esta categoría con algunos conceptos próximos. Las distinciones conciernen al foco del análisis; no establecen clases excluyentes de personas o procesos.

Tabla 1. Distinciones entre conceptos próximos

Concepto	Foco del análisis	Diferencia relevante
Descarga cognitiva	Redistribución de las exigencias de procesamiento.	Puede favorecer el aprendizaje; no implica deterioro.
Sesgo de automatización	Deferencia indebida hacia la salida del sistema.	Puede existir aunque se advierta la discrepancia.
Deskilling	Pérdida de destrezas previamente adquiridas.	Puede incluir un componente perceptivo; no se postula exclusión.
Dependencia epistémica	Apoyo en agentes, instrumentos o instituciones.	Puede estar justificada y conservar capacidad de comprobación.
Atrofia perceptiva	Deterioro de discriminaciones relevantes ya adquiridas.	Requiere evidencia de pérdida; no basta menor rendimiento entre grupos.
Desarrollo insuficiente	Adquisición limitada de una capacidad pertinente.	No presupone una competencia previa que se haya perdido.

Dos situaciones permiten ilustrar lo que añade esta categoría. En la primera, un estudiante advierte una discrepancia y, pese a ello, acepta la etiqueta del clasificador: el problema principal puede ser la deferencia. En la

segunda, el estudiante no distingue el indicio que debería motivar una comprobación, incluso cuando dispone de tiempo y no ve la recomendación automática: en tal caso sería pertinente investigar su capacidad perceptiva. La diferencia no prueba la existencia de mecanismos enteramente separados. Permite, en cambio, evitar que una evaluación de la confianza sustituya a una evaluación de la discriminación.

5.2 Resistencia material

El primer criterio pregunta si la actividad conserva vías de confrontación con restricciones empíricas pertinentes que no dependan únicamente de aceptar la salida del modelo evaluado. Incluye la resistencia sensorimotora de una manipulación cuando dicha capacidad forma parte del objetivo, sin reducirse a ella. Un conjunto de registros de procedencia documentada, un experimento remoto o la comparación con mediciones independientes pueden mantener formas de contraste causal-material sin que el estudiante esté físicamente junto al objeto.

La independencia de las evidencias es relativa y ha de examinarse en cada caso. Dos visualizaciones de un mismo resultado no constituyen dos evidencias independientes. Tampoco cumple la misma función comparar una predicción con un dato utilizado para entrenarla que contrastarla con información nueva. Este criterio se inspira en la importancia de intervenir y controlar las condiciones de observación [7]; su formulación curricular, sin embargo, es una propuesta de nuestro análisis. No exige que cada estudiante reproduzca personalmente todas las cadenas experimentales que sustentan una disciplina. Exige que aprenda cómo se justifican y cuándo resultan insuficientes para la pregunta planteada.

Conviene no confundir la resistencia con cualquier dificultad. Una interfaz confusa puede obstaculizar el trabajo sin enseñar nada sobre el fenómeno. El peligro, el esfuerzo manual innecesario o una modalidad sensorial determinada tampoco son requisitos. Lo decisivo es que la discrepancia tenga significado para la capacidad que se pretende formar y que haya una vía adecuada para investigarla.

5.3 Apertura epistémica

El segundo criterio concierne a las posibilidades efectivas de revisar preguntas, supuestos, procedimientos o interpretaciones. Remite, por tanto, a permisos, recursos y responsabilidades: quién puede cambiar el modelo, proponer una explicación alternativa, conservar un resultado discordante o solicitar otra comprobación. Invitar a «pensar críticamente» no basta si la evaluación solo premia la reproducción de una respuesta prefijada. La apertura es posible tanto con objetos físicos como con objetos digitales, y admite grados según el nivel educativo.

Una práctica puede ser abierta sin que durante su realización se produzca una sorpresa. Un estudiante puede elegir entre explicaciones, revisar supuestos y diseñar contrastes, aunque todos los resultados coincidan con sus expectativas. La apertura caracteriza la estructura de las posibilidades de revisión, no la ocurrencia de un acontecimiento inesperado. Tampoco exige prescindir de la orientación docente. Los apoyos para formular una alternativa pueden ampliar la agencia de quien todavía no sabe cómo hacerlo.

5.4 Posibilidad de sorpresa

El tercer criterio pregunta si el entorno proporciona oportunidades para encontrar, advertir y registrar discrepancias respecto de expectativas explícitas. Su aplicación es relativa al estudiante, a la tarea y a lo anticipado. Un resultado conocido por el docente puede constituir una sorpresa formativa para el alumno. Esta puede proceder de una medición, de un error de preparación o de un comportamiento computacional inesperado. No exige que el fenómeno sea indeterminista ni que el descubrimiento resulte nuevo para la comunidad científica.

La sorpresa, por su parte, puede producirse sin apertura. Una simulación puede presentar una desviación y obligar a seguir un itinerario fijo que impida interrogarla. Un laboratorio físico puede producir un resultado anómalo que la consigna ordene descartar. En ambos casos se percibe una discrepancia, pero se carece de autoridad y de recursos para revisar la investigación. También cabe la situación inversa: una tarea autoriza revisiones, pero filtra todos los datos discrepantes. Dispone de apertura procedimental, aunque empobrece las oportunidades de confrontarla con evidencia inesperada. Estas posibilidades justifican la distinción entre ambos criterios. No prueban su independencia causal o estadística, sino su falta de equivalencia conceptual.

Una sorpresa que no se elabora puede distraer o inducir a error. El criterio no prescribe, por tanto, maximizar el desconcierto. Prescribe evitar la eliminación sistemática de ocasiones pertinentes para reconocer un desajuste. Su

valor educativo depende del trabajo posterior: documentar lo observado, considerar hipótesis y decidir qué merecería contrastarse. La Tabla 2 sintetiza las tres preguntas y sus límites.

Tabla 2. Criterios propuestos para examinar una secuencia formativa

Criterio	Pregunta de evaluación	Límite conceptual
Resistencia material	¿Existen contrastes empíricos pertinentes y se conoce su procedencia?	No equivale a presencia física ni a dificultad de la interfaz.
Apertura epistémica	¿Puede el estudiante revisar supuestos, procedimientos o interpretaciones?	No exige que ocurra una sorpresa en cada actividad.
Posibilidad de sorpresa	¿Pueden encontrarse y registrarse discrepancias relevantes frente a lo esperado?	Puede existir sin permiso para revisar; no exige indeterminismo.

Los criterios anteriores orientan la evaluación. No constituyen una escala psicométrica ni condiciones suficientes para garantizar el aprendizaje. Carecen de pesos establecidos y no permiten obtener, por suma, una puntuación global válida. Una actividad introductoria puede restringir temporalmente alguna de estas dimensiones; lo decisivo es que la secuencia proporcione después oportunidades adecuadas. El riesgo merece atención cuando una restricción persistente afecta a capacidades que el currículo afirma desarrollar y no se comprueba si otras experiencias compensan dicha restricción.

6 Objeciones y alcance de la tesis

6.1 Extensión cognitiva y transformación de las destrezas

La tesis de la mente extendida sostiene que algunos procesos cognitivos pueden incluir recursos externos [25]. La cognición distribuida de Hutchins, por su parte, sitúa el análisis en sistemas que coordinan personas, instrumentos y representaciones [26]. Ninguna de estas perspectivas obliga a considerar beneficiosa toda incorporación tecnológica. Tampoco autoriza a juzgar el aprendizaje únicamente por lo que un individuo hace sin apoyos. Un sistema puede mejorar su competencia colectiva y redistribuir legítimamente el trabajo. Hay que dilucidar, por tanto, si el estudiante aprende a participar responsablemente conforme a su función y conserva recursos para detectar límites o solicitar ayuda.

Cabe plantear así una objeción fuerte a nuestra tesis: lo que parece una pérdida puede ser una reorganización adaptativa. Nuevas capacidades para inspeccionar datos, interpretar la incertidumbre o comparar modelos pueden reemplazar operaciones que han dejado de ser centrales. La réplica no puede atribuir valor a una destreza histórica por el mero hecho de haber precedido a la nueva. Para hablar de un deterioro educativamente relevante habrá que justificar que la capacidad desplazada sigue siendo necesaria para las tareas previstas de transferencia, control o aprendizaje. Habrá que mostrar, asimismo, que la nueva configuración no aporta un recurso equivalente. Si lo aporta, el diagnóstico de atrofia perjudicial deberá revisarse.

La opacidad tampoco implica necesariamente la desaparición del control epistémico. Ratti propone una interpretación matizada de dicho control en la ciencia basada en aprendizaje automático, atendiendo a las condiciones de seguimiento y de atribución de responsabilidades [27]. Utilizamos este argumento como contrapunto teórico, sin atribuirle la función de validar empíricamente nuestras propuestas educativas. Su consecuencia para el presente marco es clara: documentar decisiones, contrastar resultados y distribuir competencias puede ser más adecuado que exigir a cada individuo una comprensión exhaustiva de todos los cálculos.

6.2 Experiencia material sin prioridad universal

La experiencia con materiales puede ser especialmente pertinente cuando se pretende reconocer contingencias de una manipulación, calibrar un aparato o coordinar una intervención corporal. Esta afirmación situada no convierte dicha experiencia en condición universal y anterior de toda competencia computacional crítica. La evidencia de transferencia desde simulaciones [11], así como la diversidad de objetivos de los laboratorios [9], impide defender tal prioridad sin restricciones. Según el caso, la secuencia adecuada puede comenzar con una simulación, alternar modalidades o recurrir a registros y experimentos remotos.

La formulación defendible es, por tanto, una hipótesis de complementariedad dependiente de la tarea. Cuando los objetivos incluyen discriminaciones vinculadas a contingencias materiales, conviene conservar experiencias que permitan aprenderlas y comprobar si otras modalidades proporcionan una preparación equivalente. No establecemos una duración óptima ni un orden general. En las disciplinas donde el acceso al objeto es principalmente computacional o instrumental, el contraste pertinente puede consistir en examinar la procedencia, los supuestos y las evidencias convergentes, sin postular una observación directa imposible.

Esta precisión evita también erigir una forma corporal de participación en patrón excluyente. Las tecnologías asistivas, la representación sonora, la ampliación visual o la manipulación remota pueden habilitar agencia perceptiva. El criterio educativo ha de atender a las oportunidades accesibles de discriminación y corrección, sin imponer el uso de los mismos sentidos o movimientos. El aprendizaje encarnado es compatible con el diseño de entornos digitales [28].

7 Distribución de oportunidades y dimensión política

La agencia perceptiva depende de condiciones institucionales: acceso a equipos, mantenimiento, tiempo de práctica, grupos de tamaño manejable y apoyo docente. El informe del National Research Council sobre los laboratorios de enseñanza secundaria en Estados Unidos documentó desigualdades de instalaciones y recursos asociadas a la composición socioeconómica de los centros [29]. Conviene precisar el alcance de este antecedente. Se refiere a un contexto localizado y es anterior al auge de la IA generativa. No demuestra una sustitución actual de laboratorios por IA, ni permite describir por sí solo otros sistemas educativos.

El informe GEM de UNESCO de 2023 examina tanto las posibilidades de ampliar el acceso mediante la tecnología como las desigualdades de conectividad, recursos y condiciones de uso [30]. Proporciona un marco más amplio desde el que evitar dos supuestos: que la digitalización iguala automáticamente las oportunidades y que el empleo de recursos virtuales implica necesariamente una formación inferior. Para quien carecía de acceso a experiencias de indagación, un laboratorio virtual puede suponer una ampliación sustancial de oportunidades. La comparación ha de hacerse con la alternativa real, no con un laboratorio ideal inexistente.

Por ello, formulamos la hipótesis política del artículo de manera explícitamente condicional. Si las restricciones presupuestarias concentran en ciertos grupos actividades que no permiten practicar capacidades relevantes, mientras otros acceden a secuencias con mayores oportunidades de intervención y contraste, podría producirse una distribución desigual de la agencia perceptiva. Para contrastar esta hipótesis habría que investigar las decisiones presupuestarias, las oportunidades efectivas y los resultados de aprendizaje. No basta citar la brecha digital, ni atribuir una dinámica uniforme a las instituciones que disponen de menos recursos.

La exigencia normativa consiste en evaluar qué pueden hacer y aprender los estudiantes, con independencia de la etiqueta tecnológica del recurso. Compartir infraestructuras, recurrir a laboratorios remotos, emplear materiales asequibles o ampliar el acceso a registros científicos puede formar parte de respuestas justas. No determinamos aquí qué combinación será más eficaz en cada contexto. Sostenemos que una política de acceso a representaciones ha de examinar también el acceso a las condiciones que permiten interrogarlas y participar en las decisiones que organizan la indagación.

8 Propuestas pedagógicas y validación futura

8.1 Calibración perceptiva mediante contrastes

Nuestra primera propuesta consiste en una actividad de comparación que haga visibles las diferencias entre lo anticipado, lo representado y lo medido. En una unidad sobre circuitos, el estudiante formula una predicción,

explora un modelo y compara sus resultados con mediciones obtenidas en un montaje físico o remoto. Se le pide que registre las discrepancias y justifique si podrían proceder del montaje, del instrumento, de una idealización o de una interpretación incorrecta. El orden de estas operaciones puede variar según los conocimientos iniciales. No presuponemos que comenzar con materiales sea siempre preferible.

Las variaciones han de seleccionarse en función del objetivo de aprendizaje. Si se pretende detectar fallos de conexión, la evaluación deberá incluir un caso nuevo que presente esa dificultad; resolver correctamente una ecuación no sustituye dicha prueba. Cuando solo se dispone de registros previamente obtenidos, se conserva su procedencia y se explicita que analizarlos no entrena, por sí solo, la manipulación. Esta estrategia responde principalmente a la resistencia material y a la posibilidad de sorpresa. Su eficacia para prevenir el deterioro, sin embargo, no ha quedado establecida en este trabajo.

8.2 Examen guiado de la procedencia y los límites

La segunda propuesta incorpora la cadena de representación a la tarea de aprendizaje. Ante una clasificación automática, el estudiante identifica qué dato se registró, qué transformaciones recibió, qué produce el modelo y qué prueba respalda el uso previsto. La actividad incluye casos discrepantes y un procedimiento para discutirlos. No exige abrir por completo la caja negra. Su resultado es una justificación limitada y explícita de la confianza, acompañada de preguntas cuya respuesta requeriría evidencia adicional.

En un módulo de estructura proteica, cabe comparar una predicción de AlphaFold2 con una estructura experimental correspondiente, siempre que se documenten la correspondencia, las regiones comparables y las condiciones relevantes. Se examinan los indicadores de confianza y se distingue la concordancia estructural local de las inferencias sobre la función. Conviene evitar una falsa continuidad experimental: extraer ADN de una muestra y visualizar una proteína elegida de una base de datos no debe presentarse como una única cadena experimental. Para sostener esa continuidad serían necesarios pasos de identificación y correspondencia que una práctica introductoria puede no realizar.

8.3 Indagación híbrida y responsabilidad compartida

La tercera propuesta organiza una pregunta que recorre la preparación de evidencia, el tratamiento computacional y la discusión de resultados. En una actividad de microscopía, por ejemplo, los estudiantes pueden producir o recibir registros documentados, realizar una clasificación inicial, compararla con la salida de un sistema y decidir qué desacuerdos requieren revisar la muestra o el procedimiento. Se trata de un diseño hipotético, que presupone la disponibilidad de recursos y de un sistema apropiado. No presentamos una intervención aplicada en este trabajo.

El carácter híbrido de esta indagación no procede de la mera alternancia entre pantalla y mesa. Requiere continuidad de la pregunta, trazabilidad de los registros y distribución explícita de las decisiones. Puede incorporar participación remota o colaboración entre estudiantes que desempeñen funciones diferentes, siempre que la evaluación compruebe las capacidades atribuidas a cada uno. Los desacuerdos han de resolverse mediante criterios de evidencia pertinentes, sin preferencia automática por lo humano o por lo algorítmico. Con esta organización se pretende articular los tres criterios, sin afirmar que su combinación garantice un efecto preventivo.

8.4 Cómo contrastar las propuestas

Las tres estrategias se derivan normativamente del marco propuesto y requieren validación. Un programa de investigación podría comparar secuencias que ofrecieran distintas oportunidades de inspección y contraste, manteniendo comparables los objetivos, el tiempo, los contenidos y el apoyo docente. La asignación debería controlar las diferencias iniciales y, cuando fuera viable, realizarse aleatoriamente por grupos. Un diseño longitudinal permitiría distinguir la pérdida de capacidad en una misma persona de las diferencias de adquisición entre estudiantes. Conviene advertir que la aleatorización no resolvería, por sí sola, la validez de las medidas ni la posible influencia del docente.

Las variables principales deberían definirse antes del análisis de los resultados: discriminación de anomalías pertinentes, falsos avisos, elección de comprobaciones y ajuste entre confianza y acierto. Los casos de evaluación habrían de incluir situaciones nuevas y dificultades relevantes para la práctica, evitando medir únicamente la

familiaridad con una interfaz. Convendría evaluar tanto el desempeño con herramientas como tareas de transferencia que permitieran precisar la aportación de cada componente. Retirar una tecnología asistiva necesaria no constituye una prueba válida de competencia individual. Las observaciones, los registros de acción y las entrevistas podrían complementar estas medidas, pero no sustituirlas.

Una medición diferida ayudaría a distinguir el rendimiento inmediato de la retención. También serían necesarias rúbricas justificadas de antemano, evaluadores que desconocieran la condición cuando ello fuera posible y un análisis de explicaciones alternativas, como la motivación, la carga de trabajo o los conocimientos previos. El tamaño muestral y el efecto mínimo relevante habrían de establecerse mediante un plan de precisión o potencia adecuado al diseño; no corresponde atribuirles aquí cifras inventadas. Para examinar la justicia educativa habría que registrar, además de los resultados medios, las oportunidades reales de práctica, la disponibilidad de apoyos y los recursos institucionales.

El marco ha de exponerse a resultados que lo debiliten. Una transferencia igual o superior en las capacidades pertinentes, sostenida en el tiempo pese a una menor interacción física, cuestionaría la necesidad de dicha interacción en la tarea estudiada. Si el supuesto deterioro desapareciera al controlar los conocimientos iniciales, habría que revisar el diagnóstico perceptivo. Otro tanto ocurriría si se limitara a una preferencia por la recomendación automática y la capacidad de discriminación permaneciera intacta. Esta apertura a la refutación evita interpretar cualquier diferencia entre modalidades como evidencia favorable a la hipótesis.

9 Conclusiones

La incorporación de IA a la educación científica plantea una pregunta sobre la formación de la observación científica: qué capacidades se ejercitan cuando se delega parte del trabajo y cómo se comprueba que el rendimiento asistido corresponde a un aprendizaje relevante. Hemos propuesto la atrofia perceptiva como categoría para investigar una posible pérdida de discriminaciones adquiridas, distinguiéndola de la adquisición insuficiente, la confianza excesiva y la reorganización adaptativa de destrezas. No hemos establecido su prevalencia ni demostrado un efecto causal de la IA.

La comparación entre simulación, clasificación de registros y predicción estructural muestra que estas mediaciones mantienen relaciones distintas con sus objetos y sus fuentes de evidencia. PhET no se clasifica como IA; la visualización de AlphaFold2 se distingue tanto de una imagen experimental como de una ilustración generada. Las funciones sustitutiva, amplificadora y metaperceptiva dependen del diseño de la actividad y pueden coexistir. Por ello, no permiten ordenar las tecnologías en una escala fija de riqueza o empobrecimiento.

Hemos propuesto la resistencia material, la apertura epistémica y la posibilidad de sorpresa como criterios relacionados, pero conceptualmente diferenciables. Conciernen, respectivamente, a la confrontación empírica, la capacidad de revisión y el encuentro con discrepancias. Su aplicación exige atender a los objetivos, a la accesibilidad y al conjunto de la secuencia formativa. Tanto las propuestas de calibración, examen de procedencia e indagación híbrida como la hipótesis de una distribución institucional desigual de la agencia perceptiva requieren contrastes empíricos.

La posición que hemos defendido no exige que la experiencia física sea universalmente anterior, ni que la transparencia computacional sea completa. Exige justificar qué capacidades se pretende formar y conservar oportunidades apropiadas para aprenderlas, reconocer sus límites y revisarlas. Una representación contribuye a la educación científica cuando el estudiante aprende también qué autoriza a afirmar, qué deja indeterminado y cómo podría corregirse.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno Vasco, a través del Departamento de Ciencia, Universidades e Innovación, en el marco del Programa Posdoctoral, de Perfeccionamiento de Personal Investigador Doctor, correspondiente al periodo 2025–2028.

Referencias

[1] E. F. Risko y S. J. Gilbert. Cognitive offloading. Trends in Cognitive Sciences, 20(9):676–688, 2016. doi: 10.1016/j.tics.2016.07.002.

[2] R. Parasuraman y V. Riley. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. Human Factors, 39(2):230–253, 1997. doi: 10.1518/001872097778543886.

[3] P. Wulff y M. Kubsch. Learning against the machine: the double edged sword of (Gen)AI in STEM education. International Journal of STEM Education, 12:66, 2025. doi: 10.1186/s40594-025-00588-6.

[4] C. R. Klein y R. Klein. The extended hollowed mind: why foundational knowledge is indispensable in the age of AI. Frontiers in Artificial Intelligence, 8:1719019, 2025. doi: 10.3389/frai.2025.1719019.

[5] A. Rivera-Novoa y D. A. Duarte Arias. Generative artificial intelligence and extended cognition in science learning contexts. Science & Education, 35:755–776, 2026. Publicado en línea en 2025. doi: 10.1007/s11191-025-00660-1.

[6] D. Ihde. Technology and the Lifeworld: From Garden to Earth. Indiana University Press, 1990. doi: 10.2979/3108.0.

[7] I. Hacking. Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science. Cambridge University Press, 1983. doi: 10.1017/CBO9780511814563.

[8] H.-J. Rheinberger. Toward a History of Epistemic Things: Synthesizing Proteins in the Test Tube. Stanford University Press, 1997.

[9] T. de Jong, M. C. Linn y Z. C. Zacharia. Physical and virtual laboratories in science and engineering education. Science, 340(6130):305–308, 2013. doi: 10.1126/science.1230579.

[10] N. Rutten, W. R. van Joolingen y J. T. van der Veen. The learning effects of computer simulations in science education. Computers & Education, 58(1):136–153, 2012. doi: 10.1016/j.compedu.2011.07.017.

[11] N. D. Finkelstein, W. K. Adams, C. J. Keller, P. B. Kohl, K. K. Perkins, N. S. Podolefsky, S. Reid y R. LeMaster. When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. Physical Review Special Topics – Physics Education Research, 1:010103, 2005. doi: 10.1103/PhysRevSTPER.1.010103.

[12] M. Merleau-Ponty. Phénoménologie de la perception. Gallimard, 1945.

[13] A. Noë. Action in Perception. MIT Press, 2004.

[14] S. Gallagher. How the Body Shapes the Mind. Oxford University Press, 2005. doi: 10.1093/0199271941.001.0001.

[15] G. Bachelard. Le nouvel esprit scientifique. Félix Alcan, 1934.

[16] T. Castelão-Lawless. Phenomenotechnique in historical perspective: Its origins and implications for philosophy of science. Philosophy of Science, 62(1):44–59, 1995. doi: 10.1086/289838.

[17] P. Humphreys. Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method. Oxford University Press, 2004. doi: 10.1093/0195158709.001.0001.

[18] J. Burrell. How the machine ‘thinks’: Understanding opacity in machine learning algorithms. Big Data & Society, 3(1):1–12, 2016. doi: 10.1177/2053951715622512.

[19] E. Winsberg. Science in the Age of Computer Simulation. University of Chicago Press, 2010. doi: 10.7208/chicago/9780226902050.001.0001.

[20] S. Lisborg y O. Tafdrup. Virtual laboratories and posthuman learning. Techné: Research in Philosophy and Technology, 27(3):299–321, 2023. doi: 10.5840/techne20231016187.

[21] A. Lim, A. Nicolaides, X. Yang y B. Morkos. Postphenomenological study: Using generative knowing and science fiction for fostering speculative reflection on AI-nudge experience. Science and Engineering Ethics, 31:14, 2025. doi: 10.1007/s11948-025-00534-3.

[22] J. Jumper, R. Evans, A. Pritzel, T. Green, M. Figurnov, O. Ronneberger, K. Tunyasuvunakool, R. Bates, A. Žídek, A. Potapenko, A. Bridgland, C. Meyer, S. A. A. Kohl, A. J. Ballard, A. Cowie, B. Romera-Paredes, S. Nikolov, R. Jain, J. Adler, T. Back, S. Petersen, D. Reiman, E. Clancy, M. Zielinski, M. Steinegger, M. Pacholska, T. Berghammer, S. Bodenstein, D. Silver, O. Vinyals, A. W. Senior, K. Kavukcuoglu, P. Kohli y D. Hassabis. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. Nature, 596:583–589, 2021. doi: 10.1038/s41586-021-03819-2.

[23] EMBL-EBI. Evaluating AlphaFold2’s predicted structures using confidence scores. En AlphaFold: A practical guide, recurso formativo en línea, s. f. Consultado el 11 de septiembre de 2026. Disponible en línea.

[24] M. Polanyi. Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy. University of Chicago Press, 1958.

[25] A. Clark y D. Chalmers. The extended mind. Analysis, 58(1):7–19, 1998. doi: 10.1093/analys/58.1.7.

[26] E. Hutchins. Cognition in the Wild. MIT Press, 1995. doi: 10.7551/mitpress/1881.001.0001.

[27] E. Ratti. Epistemic control and the normativity of machine learning-based science. Prepublicación, PhilSci-Archive, registro 27926, 2025. Disponible en línea.

[28] D. Abrahamson y R. Lindgren. Embodiment and embodied design. En R. K. Sawyer (ed.), The Cambridge Handbook of the Learning Sciences, 2.ª ed., pp. 358–376. Cambridge University Press, 2014. doi: 10.1017/CBO9781139519526.022.

[29] National Research Council. America's Lab Report: Investigations in High School Science. S. R. Singer, M. L. Hilton y H. A. Schweingruber (eds.). The National Academies Press, 2006. doi: 10.17226/11311.

[30] UNESCO. Global Education Monitoring Report 2023: Technology in Education – A Tool on Whose Terms? UNESCO, 2023. doi: 10.54676/UZQV8501.