

COMPETENCIAS NECESARIAS PARA LOS FUTUROS FARMACÉUTICOS Y BIOQUÍMICOS: HABILIDADES BLANDAS, GENÓMICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Andrea Llera¹, Valeria Milchior², Nélica Mondelo³, Jean-Paul Rossi^{4*},
Ángela Solano⁵, Axel Soto⁶, Alan Talevi⁷

Editores: Jean-Paul Rossi y Nélica Mondelo

¹ Coordinadora de la Red de Estudios de la Diversidad en Cáncer de Mama en la Fundación Instituto Leloir. Fundación Instituto Leloir CONICET, Buenos Aires, Argentina. allera1966@gmail.com

² Licenciada en Psicología (UBA) especializada en capacitación y entrenamiento de equipos en habilidades blandas y estrategias de comunicación efectiva y formación en ámbitos académicos y corporativos. valeria.milchior@gmail.com

³ Coordinadora de la sección Ciencias Farmacéuticas y Farmacológicas de la Academia Nacional de Farmacia y Bioquímica, Buenos Aires, Argentina. Dirección Técnica Hemipharm SRL; Exgerente de Investigación y Desarrollo, GADOR SA. nmondeloberta@gmail.com

⁴ Investigador Superior contratado CONICET; Profesor Titular Plenario Consulto Depto. de Química Biológica, Facultad de Farmacia y Bioquímica e Instituto de Química y Físicoquímica Biológicas (IQUIFIB. UBA-CONICET) Universidad de Buenos Aires. vonckers@gmail.com

⁵ Jefe de Genotipificación, Depto. de Análisis Clínicos, Centro de Estudios Médicos e Investigaciones Clínicas, Facultad de Medicina, (CEMIC. UBA-CONICET). Universidad de Buenos Aires, Argentina. drsolanoangela@gmail.com

⁶ Investigador del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICET) Instituto de Ciencias e Ingeniería de la Computación (ICIC-UNS) <http://bit.ly/axelsotoICIC>, axel.soto@cs.uns.edu.ar

⁷ Investigador del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Bioactivos (LIDeB-UNLP CONICET), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata. Provincia de Buenos Aires. Argentina. alantalevi@gmail.com, atalevi@biol.unlp.edu.ar

* Autor a quién dirigir la correspondencia: vonckers@gmail.com

RESUMEN

Las ciencias farmacéuticas y bioquímicas están experimentando una profunda transformación gracias a la convergencia de la inteligencia artificial (IA), la genómica de precisión y las habilidades interpersonales. La IA está revolucionando el descubrimiento y desarrollo de fármacos al predecir su eficacia y toxicidad de manera acelerada y también mejora la farmacovigilancia al detectar efectos adversos sutiles. Paralelamente, la genómica de precisión permite la personalización de tratamientos basados en el perfil genético de cada paciente, optimizando la respuesta a fármacos y minimizando efectos secundarios. Sin embargo, el éxito de estas tecnologías depende crucialmente de las habilidades humanas. La comunicación interdisciplinaria y el pensamiento ético son esenciales para integrar la tecnología en la práctica clínica y abordar los dilemas asociados al manejo de la información genética. Los profesionales que dominan estos tres dominios (tecnológico, genómico e interpersonal) se posicionan estratégicamente en el mercado laboral, emergiendo en roles innovadores que conectan la ciencia de vanguardia con las necesidades de los pacientes. Este nuevo paradigma redefine el papel del farmacéutico y bioquímico, convirtiéndolos en puentes esenciales entre la innovación científica y la atención médica.

SUMMARY

Pharmaceutical and biochemical sciences are undergoing a profound transformation thanks to the convergence of artificial intelligence (AI), precision genomics, and interpersonal skills. AI is revolutionizing drug discovery and development by accelerating the prediction of drug efficacy and toxicity, and it's also improving pharmacovigilance by detecting subtle adverse effects. In parallel, precision genomics enables the personalization of treatments based on each patient's unique genetic profile, optimizing drug response and minimizing side effects. However, the success of these technologies crucially depends on human skills. Interdisciplinary communication and ethical reasoning are essential for integrating technology into clinical practice and addressing dilemmas related to genetic information management. Professionals who master these three domains technological, genomic, and interpersonal— are strategically positioned in the job market. They are taking on innovative roles that connect cutting-edge science with patient needs. This new paradigm redefines the role of pharmacists and biochemists, transforming them into essential bridges between scientific innovation and healthcare.

Palabras clave: Inteligencia Artificial (IA), Genómica de Precisión, Habilidades Interpersonales, Descubrimiento de Fármacos, Medicina Personalizada

Key words: Artificial Intelligence (AI), Precision Genomics, Interpersonal Skills, Drug Discovery, Personalized Medicine

JORNADA DE CAPACITACIÓN ¹

- Con el auspicio de la ACADEMIA NACIONAL DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA Comisión de Educación de la farmacia y la bioquímica
- Con el patrocinio de **SINERGIA** ² (Laboratorios Roemmers)

INTRODUCCIÓN

La Convergencia Transformadora en Ciencias Farmacéuticas: Inteligencia Artificial, Genómica y Habilidades Interpersonales

El panorama actual de las ciencias farmacéuticas y bioquímicas se encuentra en un punto de inflexión, donde la confluencia de tecnologías disruptivas y la inteligencia humana están redefiniendo radicalmente el alcance y las posibilidades de estas disciplinas. La inteligencia artificial (IA), la genómica de precisión y el desarrollo de sólidas habilidades interpersonales emergen como pilares fundamentales que, al integrarse, multiplican exponencialmente el impacto de los profesionales en el cuidado de la salud.

La IA ha revolucionado el descubrimiento y desarrollo de fármacos, acortando drásticamente los plazos que antes se medían en décadas. Algoritmos avanzados analizan vastas cantidades de compuestos y sus interacciones moleculares, prediciendo eficacia y toxicidad con una exactitud sin precedentes (Paul *et al.* 2021). Esta aceleración no solo optimiza costos, sino que también abre nuevas vías para investigar soluciones a enfermedades raras o complejas, antes consideradas inviables económicamente. La farmacovigilancia también se beneficia enormemente, ya que los sistemas de IA detectan patrones sutiles en extensos datos de pacientes, identificando efectos adversos que los métodos tradicionales podrían pasar por alto (Al-Khateeb *et al.* 2020). Así, el bioquímico expande su rol, participando activamente en el desarrollo de algoritmos que modelan intrincadas cascadas metabólicas y muchas otras áreas cruciales para farmacéuticos y bioquímicos.

Paralelamente, la genómica de precisión está transformando nuestra comprensión fundamental de la respuesta individual a los medicamentos. El antiguo enfoque de “talla única” está cediendo paso a tratamientos personalizados, basados en el perfil genético único de cada paciente (Shuldiner y Sadee, 2018). Farmacéuticos y bioquímicos con experticia en genómica pueden anticipar la respuesta a fármacos, prever interacciones farmacológicas y farmacocinéticas, recomendar alternativas optimizadas genéticamente, personalizar dosis y minimizar efectos secundarios con una precisión notable. En el abordaje de enfermedades complejas, la capacidad de interpretar información genómica puede marcar la diferencia entre un tratamiento general con resultados modestos y una intervención específica con una eficacia significativamente superior.

Sin embargo, estas sofisticadas tecnologías demandan un complemento humano igualmente avanzado. Las habilidades interpersonales actúan como el nexo vital que conecta la tecnología con su aplicación práctica. La comunicación interdisciplinaria se vuelve crucial cuando farmacéuticos y bioquímicos colaboran con científicos de datos, médicos especialistas y genetistas. El pensamiento ético adquiere una relevancia primordial ante los dilemas sobre el manejo de información genética o la implementación de algoritmos que influyen en decisiones críticas de tratamiento (Green *et al.*, 2013). La adaptabilidad constante se convierte en una necesidad imperante en un campo donde el conocimiento evoluciona rápidamente.

El profesional que logra integrar estos tres dominios —tecnológico, genómico e interpersonal— se sitúa en una posición estratégica en el mercado laboral. Emergen roles innovadores como consultores en medicina personalizada, especialistas en farmacogenómica o desarrolladores de soluciones basadas en IA para el diagnóstico

¹ Los pasados 9 y 10 de mayo de 2025, el hotel Argenta Tower fue sede de unas importantes jornadas que contaron con el auspicio de la Academia Nacional de Farmacia y Bioquímica y el patrocinio de Sinergia, una destacada iniciativa de la empresa Roemmers. El encuentro reunió a un público selecto, incluyendo docentes, decanos y alumnos elegidos por las facultades de Farmacia y Bioquímica de las universidades nacionales de Córdoba, Misiones, Rosario, Tucumán y la Universidad de Buenos Aires. Durante el evento, reconocidos expertos compartieron sus conocimientos sobre temas de vanguardia como habilidades blandas, inteligencia artificial y genómica de precisión.

² **Sinergia**, es una iniciativa clave de Roemmers encabezada por su gerente Comercial, Bartolomé Ketchian, que está transformando el rol de las farmacias. Su objetivo es empoderar a farmacéuticos y sus equipos mediante una formación integral que combina lo mejor de dos mundos: la práctica presencial en una farmacia simulada y la flexibilidad de la capacitación online. Con contenidos que van desde el liderazgo y la atención al cliente hasta la gestión financiera y la actualización científica, Sinergia provee las herramientas esenciales para que las farmacias se conviertan en centros de salud estratégicos, mucho más que simples puntos de venta.

precoz. Pero, más allá de las ventajas profesionales, un farmacéutico o bioquímico equipado con estas herramientas podrá comunicar información compleja de manera accesible y empática, impactando profundamente en la calidad de la atención al paciente.

Este nuevo paradigma integrador está reconfigurando las fronteras tradicionales entre disciplinas. De esta manera, tanto el farmacéutico como el bioquímico se transforman en intérpretes sofisticados de información molecular, genética y clínica, actuando como puentes esenciales entre la ciencia de vanguardia y las necesidades humanas fundamentales, combinando el poder analítico de la tecnología con la perspicacia contextual que solo la experiencia humana puede ofrecer.

Habilidades Blandas o Interpersonales

Las habilidades blandas comprenden un conjunto de competencias interpersonales y cualidades personales esenciales para interactuar eficazmente con los demás, adaptarse a diversas situaciones y prosperar tanto en el ámbito profesional como en el personal. A diferencia de las habilidades técnicas o “duras” –como la programación o el manejo de software específico– que se adquieren mediante la educación formal o la experiencia, las habilidades blandas son más difíciles de cuantificar, midiéndose indirectamente a través de la observación de comportamientos como lo señala Robles (2012) en su estudio “Executive Perceptions of the Importance of Soft Skills in the Workplace”. Están profundamente conectadas con la inteligencia emocional, la personalidad y la forma en que nos relacionamos, una idea explorada por Goleman (1996) en su obra “Inteligencia Emocional”.

La creciente relevancia de las habilidades blandas

En el mercado laboral actual, las empresas valoran cada vez más las habilidades blandas. Ya no es suficiente con poseer solo conocimientos técnicos; las organizaciones buscan profesionales que sepan trabajar en equipo, comunicarse de manera efectiva, resolver problemas con creatividad y adaptarse a los cambios constantes: La importancia de estas habilidades se destaca en “The Future of Jobs Report 2020” del *World Economic Forum* (2020). Estas habilidades son cruciales porque promueven relaciones interpersonales saludables, cultivando un ambiente de trabajo positivo y colaborativo. También incrementan la eficacia y la eficiencia, mejorando la productividad individual y del equipo al facilitar la comunicación y la resolución de problemas. Impulsan el crecimiento profesional al ser un factor diferenciador que puede abrir puertas a nuevas oportunidades y ascensos, y fortalecen la adaptabilidad al ayudar a enfrentar desafíos, manejar el estrés y desenvolverse en entornos cambiantes.

Habilidades blandas esenciales en el ámbito laboral

Existe una amplia variedad de habilidades blandas, pero algunas de las más demandadas en el ámbito laboral incluyen la comunicación efectiva, que implica la capacidad de expresar ideas de forma clara y concisa (verbalmente y por escrito) y de escuchar activamente a los demás. El trabajo en equipo se refiere a colaborar, compartir ideas y responsabilidades, y apoyar a los compañeros para alcanzar metas comunes. El liderazgo consiste en motivar, guiar e inspirar a un equipo, delegar tareas y tomar decisiones. La resolución de problemas implica identificar, analizar y evaluar soluciones ante imprevistos o conflictos. La adaptabilidad es la flexibilidad para ajustarse a nuevas circunstancias y cambios. El pensamiento crítico permite analizar y evaluar la información para tomar decisiones informadas y argumentadas. La creatividad e innovación se manifiestan al generar nuevas ideas, proponer soluciones originales y mejorar procesos. La inteligencia emocional abarca reconocer y gestionar las propias emociones, así como comprender y responder a las de los demás (empatía). La gestión del tiempo se traduce en organizar y priorizar tareas de manera eficiente para maximizar la productividad. Finalmente, la resiliencia es la capacidad de afrontar las adversidades y salir fortalecido de ellas. En síntesis, mientras que las habilidades duras permiten hacer el trabajo, las habilidades blandas permiten hacerlo bien y prosperar en cualquier entorno profesional, como lo resume Bennett (2018) en su distinción entre “Soft Skills vs. Hard Skills”.

Perspectivas de las habilidades blandas

La disertación de la Lic. Valeria Milchior busca aumentar la conciencia sobre la importancia de desarrollar las habilidades blandas y su impacto tanto en el crecimiento personal como en la gestión de equipos. Milchior subraya que no hay una definición consensuada de habilidades blandas, aunque el término proviene directamente del inglés soft skills. Su origen se remonta a los años 1960 y 1970, durante la evaluación del entrenamiento militar en Estados Unidos, donde se concluyó que la destreza técnica de los soldados no se correlacionaba linealmente con el éxito de la tropa. Esta observación es similar a la que Daniel Goleman (1996) haría años más tarde sobre la relación entre el CI y la inteligencia emocional. Hoy en día, se pueden encontrar más de quince definiciones que describen estas habilidades como competencias, actitudes o capacidades sociales, socioemocionales o interpersonales, incluyendo también la creatividad y la capacidad de adaptación. Algunas definiciones incluso las describen como “habilidades que permiten comunicarse efectivamente, resolver problemas, liderar o trabajar en equipo”.

La pedagogía sirve como un excelente ejemplo para diferenciar claramente las habilidades duras de las blandas: las excelentes notas en exámenes no garantizan la excelencia en la docencia de esa misma temática, y alguien con calificaciones modestas puede ser un docente sobresaliente. Esto evidencia que son habilidades distintas. Mientras que las habilidades duras representan el conocimiento formal mínimo para la actividad por la cual uno es contratado o forma parte de un equipo —y de alguna manera “nos igualan” en el punto de partida—, lo que verdaderamente marca la diferencia en la práctica es el dominio de las habilidades blandas.

Relevancia y desarrollo en el desempeño de roles

El desarrollo de habilidades blandas no es exclusivo de los roles de liderazgo. El simple hecho de interactuar con otras personas ya sea colaborando en equipos, atendiendo pacientes, desarrollando ideas, resolviendo conflictos o participando en proyectos, exige el ejercicio continuo de estas habilidades. No obstante, en roles que implican ser referente y ejemplo para otros, el desarrollo de estas habilidades es indispensable. Por ejemplo, la atención al público en farmacias, que requiere contener, manejar la frustración y gestionar emociones, demanda fuertemente habilidades blandas.

Estadísticas como la de Unidiversidad, que indica que un 52 % de los argentinos consideró renunciar a su trabajo por una mala relación con su jefe (Universidad Nacional de Cuyo, s.f.), ilustran el impacto directo de la calidad de las relaciones interpersonales, que a su vez dependen de las habilidades blandas.

Habilidades blandas, liderazgo e inteligencia emocional

Tanto el liderazgo como la inteligencia emocional (IE), si bien pueden definirse como capacidades, se entienden mejor como conjuntos de habilidades complejas.

El liderazgo se define como la capacidad de influir e incentivar a otros a realizar acciones alineadas con un propósito, no por obligación o temor, sino por su propia motivación. Para ello, un líder debe desarrollar un conjunto de habilidades como la comunicación, la gestión de conflictos, la negociación, la gestión de las emociones, la adaptabilidad y la empatía. Dos puntos clave sobre el liderazgo son:

1. Su evolución. Es un concepto que ha girado 180 grados, pasando de ser sinónimo de autoritarismo a un modelo de líder al servicio de otros. Valeria Milchior recomienda la lectura del libro *La empresa emergente* de Rafael Echeverría (2000).
2. La medición del éxito. El éxito de un líder ya no se mide solo por el cumplimiento de tareas y el logro de resultados individuales, sino también por el clima laboral, las promociones, la baja rotación y el nivel de compromiso del equipo. Si la prioridad del rol son las personas y el 80 % del tiempo se dedica a planificar conversaciones, lograr acuerdos, tomar decisiones que impactan en otros, resolver problemas, definir procesos de delegación y brindar retroalimentación continua para incentivar al equipo, el desarrollo de habilidades blandas y el liderazgo son inseparables.

Desafíos en roles de liderazgo

Al asumir un rol de liderazgo, los primeros desafíos que se presentan y que están directamente ligados al desarrollo de las habilidades blandas son: el reconocimiento (ser reconocido como líder por otros, no autoproclamarse), el logro de resultados a través de otros, el pensamiento a largo plazo que permite anticiparse a los cambios, tomar decisiones informadas y preparar al equipo, lo que impacta directamente en la organización. Además, gestionar equipos intergeneracionales exige trabajar continuamente con indicadores, revisar definiciones, evitar suponer entendidos comunes, actuar como mediadores y lograr consensos. En síntesis, implica asumir nuevas responsabilidades.

La inteligencia emocional es otro gran pilar para desarrollar en el camino de las habilidades blandas, y puede ser entrenada. Resulta fundamental considerar las propias emociones y las de los demás al tomar una decisión, resolver un problema o planificar una conversación.

Cómo identificar y desarrollar habilidades blandas

Un excelente punto de partida para identificar y desarrollar habilidades blandas es el autoconocimiento. Saber desde dónde se parte permite crear un plan de acción coherente y alcanzable para el logro de los objetivos propuestos (desarrollar o mejorar una habilidad específica).

Se pueden utilizar herramientas como autoevaluaciones, feedback de pares o coordinadores, y encuestas de percepción (que pueden ser anónimas). Estas últimas podrían incluir las mismas preguntas de la autoevaluación, pero dirigidas a la percepción de otros sobre la forma en que uno realiza sus tareas, permitiendo comparar los resultados para obtener una visión más objetiva. Incluso se podría administrar la misma encuesta después de seis meses o de un plan de desarrollo personal para observar cambios.

Los indicadores de mejora en las habilidades blandas pueden manifestarse de diversas maneras: una reducción de malentendidos, un aumento en la adhesión y el compromiso, la disminución de reclamos o errores, o un incremento en las propuestas espontáneas de mejora. Estos resultados deben sostenerse a largo plazo, ya que el cumplimiento por temor (al jefe o a perder el empleo) es temporal y afecta la calidad. Otros ejemplos de indicadores incluyen la mejora en el comportamiento o el vínculo después de dar feedback, una mayor participación del líder en conversaciones difíciles, la reducción de reacciones impulsivas, el aumento de la puntualidad, la disminución de llegadas tarde o un menor ocultamiento de errores.

Cada acción y conversación que protagonizamos es una pequeña manifestación no solo de nuestro conocimiento o experiencia, sino fundamentalmente del desarrollo de nuestras habilidades blandas. Por ello, es crucial preguntarse: ¿Cómo respondo ante situaciones de conflicto? ¿Las evito, las enfrento desde un rol de autoridad, o intento escuchar y lograr un acuerdo? ¿Cómo tomo decisiones? ¿Desde mi escritorio, consultando al equipo, pero tomando la decisión por mi cuenta, o promoviendo propuestas y aportes para consensuar? ¿Brindo a mi equipo retroalimentación cotidiana y formal sobre su desempeño o solo me acerco cuando alguien comete un error o su desempeño no es el esperado? ¿Qué es un error para mí? ¿Algo que no puede ocurrir, un indicador de aprendizaje, o una oportunidad de crecimiento? ¿Considero que mi rol tiene impacto sobre la formación y el incentivo del equipo? (porque si no lo considero, no dedicaré tiempo a desarrollarlo).

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Inteligencia Artificial: Qué, Cómo, Para Qué y Para Quiénes

Los cuatro pronombres interrogativos del título de esta charla —Qué, Cómo, Para Qué y Para Quiénes— estructuran el hilo conductor de la exposición del Dr. Axel Soto. En primer lugar, definiremos brevemente la IA y sus principales subdisciplinas. Luego, brindaremos ejemplos de los mecanismos clave que permiten el aprendizaje automático de patrones en métodos basados en IA. En tercer lugar, nos centraremos en casos prácticos donde la IA puede aplicarse en la industria farmacéutica y bioquímica, así como en su uso como herramienta de propósito general. Finalmente, reflexionaremos sobre el futuro de estas tecnologías y su rol en el desarrollo de múltiples disciplinas científicas y profesionales, con énfasis particular en la bioquímica y la farmacia.

Introducción

¿Puede un algoritmo descubrir nuevos medicamentos o detectar relaciones entre genes? ¿Quiénes desarrollan y utilizan esta tecnología? En este documento, abordaremos estas y otras preguntas generales. Una de las motivaciones para esta disertación es que gran parte de la sociedad actual utiliza masivamente sistemas de software basados en IA y, en general, está predispuesta a adoptar estrategias que mejoren o faciliten tareas laborales y cotidianas. Sin embargo, este uso masivo y diversificado también se da en un contexto donde el desconocimiento o los temores sobre la tecnología subyacente son aún pronunciados.

¿Qué es la Inteligencia Artificial?

Aunque hoy en día se observa una importante irrupción de sistemas basados en IA y un uso masificado de herramientas que emplean esta tecnología, la IA es una disciplina científica con más de 70 años de historia. Desde la pregunta postulada por el padre de la computación, Alan Turing (1950), sobre la capacidad de las computadoras para pensar en su ensayo "Computing machinery and intelligence", hasta la actualidad, existen innumerables debates tecnológicos y filosóficos sobre qué es la inteligencia artificial. Desde un enfoque más pragmático, se puede adoptar la definición de John McCarthy (2017), quien la definió como "la ciencia e ingeniería para desarrollar máquinas inteligentes, especialmente programas de computadoras inteligentes" en su obra "What is Artificial Intelligence?".

Una pregunta recurrente es por qué esta ciencia ha irrumpido con tanta fuerza en los últimos 10 años, si su historia se extiende por más de siete décadas. La explicación es multicausal, pero se puede destacar varios elementos clave. El más obvio es la evolución y maduración natural de la disciplina, con avances algorítmicos significativos a lo largo de los años. Por ejemplo, el mecanismo de retropropagación (*backpropagation*) y su aplicación al entrenamiento de redes profundas (*deep learning*) impulsaron una mejora sustancial en la capacidad de aprender patrones complejos sobre datos no estructurados, como lo explican LeCun, Bengio y Hinton (2015) en su artículo *Deep learning* publicado en Nature. En segundo lugar, el crecimiento en el poder computacional ha permitido resolver problemas que antes eran inviables por su tiempo de cálculo. Finalmente, otro signo de los tiempos actuales es el acceso a datos masivos, un insumo fundamental para el aprendizaje de modelos basados en IA.

La IA, a su vez, puede descomponerse en diversas disciplinas que, si bien no son mutuamente excluyentes, emulan distintos comportamientos inteligentes. Los sistemas basados en reglas operan mediante instrucciones lógicas predefinidas por expertos. Por otro lado, el aprendizaje automático permite que los sistemas aprendan a partir de datos sin una programación explícita para cada tarea. Dentro de este, el aprendizaje supervisado utiliza datos etiquetados para entrenar modelos que predicen resultados a partir de nuevas entradas. El aprendizaje no supervisado explora estructuras ocultas en datos sin etiquetas, como patrones o agrupamientos. Por su parte, la IA generativa destaca por su capacidad de producir contenido (texto, sonido, imágenes) de alta calidad con baja interacción humana. Estas subdisciplinas del aprendizaje automático, aunque no exhaustivas, son fundamentales en el desarrollo de soluciones inteligentes hoy en día.

¿Cómo funciona la Inteligencia Artificial?

Responder a esta pregunta requiere la explicación de diversos conceptos en el campo de la representación de conocimiento, la estadística y el cálculo matemático; más aun considerando la variedad de disciplinas y metodologías dentro de la IA. Por lo tanto, nos limitaremos a brindar una explicación general e intuitiva del aprendizaje supervisado, una de las subdisciplinas de mayor impacto en la actualidad.

En el aprendizaje automático supervisado, buscamos aprender un mapeo predictivo $A \rightarrow B$, que vincule una entrada A con una salida B. Esto se logra presentando al modelo (muchos) ejemplos de pares entrada-salida, (A, B), de modo que, mediante un proceso denominado entrenamiento, el modelo logre aprender la transformación matemática que permite derivar B a partir de A. Una vez entrenado, el modelo puede ser usado para predecir una salida B ante la presentación de una entrada A no vista anteriormente.

Para ejemplificar este proceso, supongamos que queremos construir un modelo que clasifique automáticamente imágenes de perros. Esto significa que, al presentarle una imagen, el modelo debe dar una salida positiva si la imagen contiene un perro o una salida negativa en caso contrario. Para entrenar este modelo, se recopila primero una gran cantidad de imágenes con el valor de la salida esperada (es decir, si la imagen contiene o no un perro). Una vez que el modelo procesa los pares de imágenes con su respectiva anotación de salida, este modelo entrenado puede usarse

para determinar automáticamente si una imagen dada contiene o no un perro.

De este paradigma de aprendizaje se desprenden importantes implicancias. La primera es que este proceso puede replicarse con datos de otra naturaleza: por ejemplo, el modelo puede entrenarse usando representaciones moleculares junto con un valor de toxicidad o actividad biológica, lo que permitiría predecir un comportamiento farmacodinámico o farmacocinético, incluso para compuestos nuevos aún no sintetizados como lo demuestran Martínez *et al.* (2022) en su estudio sobre redes neuronales profundas para la predicción de mutagenicidad *AMES*. Otra implicación es que estas tareas predictivas pueden realizarse sin requerir un conocimiento profundo del dominio de los datos, aunque sí se necesita contar con la presencia de datos suficientes sobre los que se puedan aprender dichos patrones.

¿Para qué podemos usar la Inteligencia Artificial?

La aplicación de sistemas computacionales basados en IA ha dado origen a innumerables usos. Por ejemplo, los algoritmos de visión por computadora permiten el conteo automatizado de colonias bacterianas en placas de cultivo, lo que reduce el error humano y mejora la eficiencia en laboratorios microbiológicos. Asimismo, técnicas avanzadas de aprendizaje automático, como las de IA generativa, se emplean en el diseño de nuevos compuestos químicos con propiedades farmacológicas deseadas, facilitando la identificación de candidatos prometedores en etapas tempranas del desarrollo de fármacos según Garg (2024) en su análisis sobre IA generativa para el diseño de fármacos basado en grafos. Otras aplicaciones incluyen la predicción de propiedades fisicoquímicas y toxicológicas de moléculas, el análisis de datos ómicos y la personalización de tratamientos en función de perfiles genéticos, lo que subraya el impacto transformador de la IA en la investigación biomédica y farmacéutica.

Cabe destacar que la IA, especialmente la IA generativa, adquiere un carácter transversal, convirtiéndose en una herramienta de propósito general para profesionales de diversas disciplinas. Entre los usos más extendidos de esta tecnología, se puede mencionar su capacidad para resumir grandes volúmenes de información, facilitando la comprensión de textos extensos o complejos. También es común su uso para la generación semiautomática de reportes y documentación, lo que mejora los tiempos tradicionalmente asignados a la escritura. Además, su aplicación en procesos de capacitación y formación profesional es notable, ofreciendo explicaciones accesibles de conceptos especializados y adaptando el contenido según la formación del usuario. La IA agéntica, cuya aplicación es más incipiente, permite la automatización de tareas complejas, logrando autonomía para alcanzar un objetivo.

¿Quiénes pueden sacar provecho de la Inteligencia Artificial?

Aunque es fácil observar el carácter transversal de la IA, en este punto conviene detenernos y reflexionar sobre el valor e implicancia de estas tecnologías y si efectivamente representan una mejora para distintos profesionales, en particular para aquellos de la bioquímica y farmacia.

Desde un punto de vista económico, se prevé que la IA y la IA generativa, así como las herramientas basadas en ellas, serán objeto de fuertes inversiones, por lo que se espera un ascenso continuo en su oferta y capacidades. Por otra parte, estas nuevas herramientas sugieren que gran parte del mercado laboral se verá afectado de diversas formas, dependiendo de la ubicación geográfica o las características del puesto, según la observación de Eloundou *et al.* (2023) sobre el impacto de los grandes modelos de lenguaje en el mercado laboral.

Por lo tanto, en vista del avance sostenido y acelerado de las herramientas basadas en IA, se espera que su uso continúe en ascenso, impactando de manera creciente en tareas tradicionalmente realizadas por profesionales de diversas áreas. Este panorama exige una capacitación continua por parte de los jóvenes profesionales. Destacamos como fundamentales aquellas formaciones que promueven el desarrollo de habilidades en programación y análisis de datos. Al mismo tiempo, es crucial mantener una actitud crítica y responsable frente a los riesgos asociados, como la generación de contenidos maliciosos, la aparición de alucinaciones (respuestas incorrectas con apariencia de validez) o los conflictos en torno a la propiedad intelectual. Como profesionales, estamos llamados a prestar un servicio comprometido con la sociedad, lo cual implica un uso ético de la IA. Esto permitirá aprovechar su potencial para convertirnos en mejores profesionales, al servicio del bien común.

Inteligencia Artificial: Aplicaciones en el Campo de las Ciencias Biomédicas e Integración de la Enseñanza

En su exposición el Dr. Alan Talevi plantea que actualmente, la Inteligencia Artificial (IA) ha penetrado profundamente en prácticamente todos los aspectos de la vida humana. En la era de la *Big Data* y la conectividad masiva, un porcentaje abrumador de la población urbana genera, releva y comparte datos, en principio voluntariamente, a través de sus smartphones, ya sea mediante redes sociales, plataformas de compra y venta online, plataformas de pago, aplicaciones de geolocalización y otras. Según DataReportal (<https://datareportal.com/>), 5.640 millones de personas en todo el mundo utilizaban Internet a principios de abril de 2025, lo que equivale al 68,7 por ciento de la población mundial, en tanto el número de usuarios “únicos” de telefonía móvil alcanzó en abril de 2025 los 5.810 millones. Un 87 % de los teléfonos móviles en uso, por su parte, son teléfonos inteligentes. Los datos relevados masivamente a través de estos y otros dispositivos “smart” (relojes, televisores, etc.) son hoy en día analizados mediante herramientas de IA profunda y utilizados con fines diversos, incluyendo análisis demográfico y sociológico, campañas políticas, estudios de mercado (diseño de productos “a medida”, identificación de nichos de mercado inexplorados, identificación de demandas insatisfechas, etc.). Ningún usuario de internet es un usuario meramente pasivo: cada una de sus búsquedas e interacciones online produce datos que son compilados, mapeados y analizados productivamente.

La era de la Big Data también se manifiesta, desde luego, en el ámbito de las ciencias biomédicas. Allí, la investigación se ha transformado de manera sustancial (una transformación en curso, aún inacabada) al integrar y estructurar —mediante técnicas de IA de última generación— volúmenes masivos de datos provenientes de experimentos de laboratorio, investigaciones clínicas e historiales médicos, con un aporte clave por parte de las tecnologías ómicas (genómica, epigenómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica, farmacogenómica, etc.).

Aunque la IA ha acompañado a la sociedad ya desde hace bastante tiempo (ninguna revolución comienza de la noche a la mañana, sino que se va gestando de manera progresiva, por acumulación), el interés y la inquietud al respecto se han renovado en época reciente al irrumpir en la arena pública las IAs generativas, es decir, aquellas que se centran en la creación de nuevo contenido, como texto, imágenes, música o videos, acercándose vertiginosamente a resultados indistinguibles de los de la producción humana. La más altisonante de estas IAs tal vez sea ChatGPT, el modelo de lenguaje grande (LLM) de OpenAI, refinado y potenciado en sus versiones subsecuentes gracias al perfeccionamiento de la arquitectura de sus algoritmos y por la retroalimentación humana (lo que en la jerga se denomina aprendizaje de refuerzo a partir de la retroalimentación humana). El advenimiento de las IAs generativas, y en particular de los LLM, ha sido sin duda disruptivo, también, en el campo de las ciencias biomédicas. No solo porque estas tecnologías están siendo crecientemente utilizados para generar insumos tales como artículos científicos y reportes clínicos, sino también porque muchas representaciones de entidades de gran interés biomédico, tales como proteínas, ácidos nucleicos o pequeñas moléculas, son de naturaleza textual. Por lo tanto, los LLM pueden (y son) adaptados para generar conocimiento valioso en el campo de la química, la biología molecular, la bioingeniería y otras disciplinas relacionadas.

El presente: ¿Dónde estamos?

Un análisis exhaustivo del enorme impacto generado por la IA en el campo biomédico excede, por mucho, la ambición de este artículo. No obstante, se puede dar algunos ejemplos de gran relevancia.

Uno especialmente altisonante ha sido el caso de *AlphaFold*, un algoritmo desarrollado por la empresa *DeepMind* (adquirida hace más de diez años por el imperio Google) capaz de predecir la estructura terciaria de una proteína nada más a partir de su secuencia, con una confianza considerable para ciertos tipos de proteínas, entre ellas las proteínas globulares, como lo describen Jumper, Evans, Pritzel *et al.* (2021) en *Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold*. La irrupción de *AlphaFold* ha cambiado de forma radical el campo biomédico, brindando acceso cuasi-instantáneo a modelos razonables de estructuras proteicas (por ejemplo, para emplearlas como punto de partida para descubrir nuevos fármacos). La *AlphaFold Protein Structure Database* brinda actualmente acceso abierto a más de 200 millones de estructuras proteicas predichas por esta herramienta (Varadi, Bertoni, Magana *et al.* (2024), en *AlphaFold Protein Structure Database in 2024: providing structure coverage for over 214 million protein sequences*). A fines comparativos, basta decir que el repositorio de estructuras proteicas experimentales más popular, el Protein Data Bank, cobija actualmente apenas unas 240.000 estructuras proteicas experimentales. DeepMind enuncia orgullosamente en su página, respecto a su producto estrella: “Lo que nos llevaba meses y años hacer, *AlphaFold* pudo hacerlo en un fin de semana”. No exageran. Hasta hace cinco años, lo que *AlphaFold* hace hoy en segundos se hacía, mucho más artesanalmente, mediante modelado comparativo. En el laboratorio donde trabajo teníamos líneas de investigación enteras dedicadas a ello, líneas que cerraron con *AlphaFold* por volverse

obsoletas. Si bien esta y otras herramientas similares y sus derivados no parecen ser el fin de la biología estructural, no hay duda de que la han modificado profundamente.

En el campo específico del descubrimiento de fármacos, nuestro laboratorio en la Universidad Nacional de La Plata ha producido algoritmos y flujos de trabajo sustentados en IA centrada en los datos y validados en pequeña, mediana y gran escala, que consiguen aumentar entre 40 y 50 veces la probabilidad de encontrar nuevos núcleos químicos activos, punto de partida para desarrollar nuevos fármacos, en comparación con un cribado húmedo masivo de grandes quimiotecas (ver, por ejemplo, Ruatta, Prada Gori, Fló Díaz *et al.* (2023), en *Garbage in, garbage out: how reliable training data improved a virtual screening approach against SARS-CoV-2 MPro*). Recientemente, el campo se ha sacudido con el perfeccionamiento de IAs generativas dedicadas a diseñar fármacos de novo, u optimizar núcleos químicos activos preexistentes (Loeffler, He, Tibo *et al.*, 2024), en *Reinvent 4: Modern AI-driven generative molecule design*). Estas tecnologías encuentran su complemento perfecto en los métodos computacionales de predicción de retrosíntesis, que permitirían identificar, de manera automatizada, vías sintéticas convenientes para producir las moléculas diseñadas. En 2023, las noticias resonaron en los medios de comunicación dedicados a las innovaciones más importantes en biotecnología y en el sector sanitario, al anunciarse el inicio de los clinical trials de la molécula INS018_055, primer antifibrótico con potencial aplicación como antitumoral, cuyo diseño fue asistido por IA (da Silva (2024), en *The advancement of artificial intelligence in biomedical research and health innovation: challenges and opportunities in emerging economies*). Este tipo de iniciativas están siendo replicadas a nivel local, donde empresas biotecnológicas incubadas por universidades argentinas, tales como Boolzi (Universidad Nacional de La Plata) o Meton (Universidad Austral), avanzan en la búsqueda de fármacos asistida por computadora.

Mención aparte merece el uso de IA para asistir en el diseño de estudios clínicos (Hutson, 2024), en *How AI is being used to accelerate clinical trials*), en los que se utilizan datos históricos y biomarcadores complejos para predecir qué voluntarios podrían ser más susceptibles de abandonar prematuramente un estudio (comprometiendo la relevancia estadística de sus resultados), refinar criterios de inclusión o de exclusión, o, en línea con el paradigma de la medicina personalizada, prefigurar qué pacientes podrían responder mejor a una dada intervención terapéutica.

Un posible futuro

En *¿Sueñan los androides con ovejas eléctricas?* (novela en la que se basa la mítica película de ciencia ficción *Blade Runner*), Phillip Dick presentaba un mundo donde seres sintéticos dispensables que se hacían pasar por humanos eran interrogados por perfiladores expertos, para establecer si eran humanos auténticos o artificiales. Si un ser sintético superara esta prueba, denominada “test de Voight-Kampff” significaría que tal humanoide sería, a efectos prácticos, indistinguible de los humanos y, por lo tanto, humano.

¿Estamos en ese punto, en el umbral histórico en el que el humano será desplazado por máquinas, aún en relación con las tareas más humanas de todas: la creación artística e intelectual? No se sabe. Es posible. Este año, la farmacéutica Novo Nordisk anunció, con bombos y platillos, que había empleado IA generativa para reducir el tiempo de redacción de informes clínicos con alcance regulatorio de 12 semanas a 10 minutos. El portavoz de la compañía explicó que, por cada día que se acelera la llegada de un nuevo medicamento al mercado se generan unos 15 millones de dólares en ingresos para la empresa. Había, sin embargo, otro dato importante en la noticia: con la asistencia de la máquina, se necesitaba un equipo de tan solo tres personas para redactar el informe, donde antes se empleaban 50 profesionales altamente calificados. ¿Dónde iría ese personal ocioso?

Durante la primera revolución industrial, el grueso de los artesanos fue reemplazado por la producción en serie en las primeras fábricas. Con el fordismo, muchas tareas mecánicas, repetitivas, de la industria se optimizaron mediante división del trabajo y la incorporación de líneas de montaje, más eficientes y estandarizadas. Este progreso, sin embargo, no estuvo exento de profundos cambios sociales, a veces traumáticos. ¿Qué ocurrirá si las actuales herramientas de IA se perfeccionan? ¿El elemento humano será cada vez más prescindible, ante el aluvión de imágenes, guiones, novelas, o fármacos diseñados en serie? ¿Se reducirá la carga de trabajo y, consecuentemente, la jornada laboral? ¿El ser humano tendrá más disponibilidad para el ocio? Tampoco se sabe. Nadie puede saberlo.

La posición del Dr. Talevi es que, hoy, el profesional calificado sigue siendo invaluable en muchas etapas del flujo informático: eligiendo, armonizando y curando datos, generando datos nuevos y analizando los resultados para asegurar que los mismos preserven el sentido químico y biológico. Y que el profesional (farmacéutico, bioquímico, médico, etc.) que se capacite en los dos idiomas relevantes para tales tareas (el idioma de las máquinas, la programación) y el idioma de la biomedicina, estará en ventaja competitiva para cubrir posiciones profesionales cada vez

más decisivas y probablemente cada vez más demandadas. En tal sentido, puede que sea razonable considerar la actualización de los contenidos curriculares de las carreras de corte científico para que el estudiante se acerque a la programación durante su formación de grado.

GENÓMICA DE PRECISIÓN

La Genómica como motor de la salud y la enfermedad: Un camino transversal entre disciplinas

En su exposición la Dra. Andrea Llera habla de que la genómica, al integrarse en la atención médica moderna, ofrece oportunidades significativas para mejorar la salud humana. Su aplicación abarca la prevención personalizada, el diagnóstico preciso y oportuno, el pronóstico de la evolución de enfermedades y la selección de terapias moleculares más efectivas. Sin embargo, para asegurar una distribución equitativa de estos beneficios, es crucial abordar proactivamente las desigualdades estructurales en la investigación, la práctica clínica y la formulación de políticas públicas. Este artículo de revisión explora los desafíos y las estrategias para promover el uso equitativo de la genómica en medicina, enfatizando la necesidad de diversidad poblacional en la investigación, una infraestructura de datos accesible, una implementación clínica efectiva y una alfabetización genómica generalizada.

La genómica ha experimentado una notable evolución, pasando de ser una disciplina centrada en la investigación básica —como lo demostró el Proyecto Genoma Humano— a convertirse en un campo central tanto en la investigación biomédica como en la práctica clínica actual. A medida que la información genómica se integra progresivamente en los sistemas de salud, asegurar que sus beneficios alcancen a toda la población no es solo una cuestión de justicia social, sino también una necesidad científica imperativa, como lo señala el *National Human Genome Research Institute* (2020) en “The Future of Genomics”.

Aplicaciones de la Genómica Humana en la Salud

La genómica desempeña un papel cada vez más crucial en la prevención de enfermedades, facilitando la identificación temprana de predisposiciones genéticas que incrementan el riesgo de desarrollar diversas patologías. El análisis del genoma permite detectar variantes asociadas a enfermedades cardiovasculares, cánceres hereditarios o condiciones metabólicas incluso antes de su manifestación clínica, como lo demuestran Khera *et al.* (2018) en su estudio sobre el riesgo genético de enfermedades cardiovasculares. Esto posibilita la implementación de estrategias preventivas personalizadas, como modificaciones en el estilo de vida, una vigilancia médica intensificada o intervenciones farmacológicas anticipadas. Este enfoque proactivo, fundamentado en el conocimiento molecular individual, fortalece la medicina preventiva y contribuye a reducir la carga de enfermedad a nivel poblacional.

En el ámbito de las enfermedades raras, caracterizadas por su origen genético monogénico (dominante o recesivo), la genómica se ha erigido como una herramienta fundamental para el diagnóstico y tratamiento. La identificación de variantes genéticas responsables de estas condiciones ha permitido establecer diagnósticos precisos que antes eran inalcanzables, facilitando decisiones terapéuticas más efectivas y personalizadas, según Kingsmore y Saunders (2016) en su revisión sobre pruebas a escala genómica para enfermedades genéticas. Esta aproximación no solo reduce drásticamente el tiempo de la “odisea diagnóstica”, mejorando la calidad de vida de los pacientes, sino que también optimiza el uso de recursos sanitarios al minimizar diagnósticos erróneos y tratamientos ineficaces.

En oncología, la genómica ha transformado profundamente la comprensión y el abordaje terapéutico del cáncer. El análisis del perfil genético de los tumores permite identificar mutaciones específicas que impulsan el crecimiento maligno, facilitando la selección de tratamientos dirigidos con mayor precisión, como lo destacan Garraway y Lander (2013) en “Lessons from the cancer genome”. Esto ha revolucionado el desarrollo de fármacos, impulsando la búsqueda de terapias contra blancos moleculares concretos, lo que mejora la eficacia terapéutica y reduce los efectos adversos. Además, la genómica contribuye a la identificación de biomarcadores predictivos (de respuesta a terapias) y pronósticos (de recurrencia y evolución tumoral), esenciales para la estratificación de pacientes y la selección terapéutica. Estos avances han marcado el inicio de una nueva era en la oncología, centrada en terapias más racionales y basadas en evidencia molecular.

Principios fundamentales para una medicina genómica equitativa

Un principio rector en genómica humana es maximizar su aplicabilidad para toda la población. Esto exige un compromiso activo con la inclusión de grupos diversos, especialmente aquellos históricamente desatendidos, para evitar que las tecnologías genómicas amplíen las disparidades de salud existentes, un punto enfatizado por Popejoy y Fullerton (2016) en su revisión sobre genómica y disparidades de salud. Fomentar una fuerza laboral diversa es clave para la innovación sostenida y para asegurar que la genómica responda a múltiples perspectivas culturales y científicas.

Actualmente, se reconocen las siguientes barreras para la equidad en genómica:

a. Subrepresentación poblacional en estudios genómicos

Una gran parte de la investigación genómica se ha centrado en poblaciones de ascendencia europea, lo que limita el descubrimiento de variantes relevantes en otros grupos y compromete la validez de herramientas clínicas como los puntajes de riesgo poligénico (PRS), como se discute en Popejoy y Fullerton (2016). Así como existen adaptaciones genéticas de las poblaciones a su entorno geográfico (ej., polimorfismos de resistencia a la altura o al arsénico en el agua), también se han dado variaciones genéticas que impactan en la susceptibilidad a enfermedades (ej., variantes asociadas a la talasemia que protegen contra la malaria), según Palma-Martínez *et al.* (2025) en “Evolution, Genetic Diversity, and Health”. Esto ha derivado en la clasificación errónea de variantes, particularmente en pacientes de ascendencia africana y latinoamericana, con implicaciones clínicas significativas.

b. Accesibilidad y gestión de datos genómicos

Los datos generados fuera de entornos tradicionales de investigación —por ejemplo, en empresas con servicios directos al consumidor (DTC) o en los silos de los servicios de laboratorio diagnóstico— suelen estar fragmentados y poco accesibles, según una visión estratégica del National Human Genome Research Institute (Green *et al.*, 2020). Promover el acceso amplio a estos datos y vincularlos con información clínica es necesario para universalizar la investigación basada en ellos. Se han propuesto los principios FAIR (datos localizables, accesibles, interoperables y reutilizables) para garantizar el uso ético y eficaz de estos datos, para lo cual es esencial primero resolver los problemas de gobernanza, privacidad y estandarización.

c. Limitada implementación clínica

A pesar de los avances en aplicaciones genómicas comprobadas, su integración en la atención médica es aún incipiente. Los campos más beneficiados hasta el momento son los de enfermedades raras (particularmente en neurología) y, sobre todo, el cáncer. En el caso del cáncer, la adopción de la medicina genómica fue impulsada por el desarrollo de terapias enfocadas en genes clave para el desarrollo tumoral (ej., el gen BRAF en melanoma o la fusión BCR-ABL en leucemia mieloide crónica). Sin embargo, incluso en oncología, el desconocimiento sobre cómo interpretar correctamente los estudios genómicos ha frenado su uso: los profesionales de la salud, con pocas herramientas para interpretar la información genómica, evitan recomendar estudios genómicos costosos si no están seguros de su utilidad clínica. Se requieren enfoques de ciencia de implementación que capaciten al personal sanitario en el manejo de información genómica y promuevan herramientas clínicas integradas a sistemas electrónicos de salud, basadas en bases de datos curadas y actualizadas, como lo sugieren Green *et al.* (2020).

Estrategias para una Genómica Equitativa

El uso universal de la genómica clínica solo puede lograrse cumpliendo las siguientes etapas preparatorias para su implementación:

- a. Generación de datos representativos. Es imperativo diseñar estudios específicos para distintas poblaciones, adaptados a sus contextos sociales y ambientales, un punto clave según Popejoy y Fullerton (2016). Se necesitan metodologías robustas para identificar loci de enfermedad y calcular PRS válidos en poblaciones diversas.
- b. Uso clínico ampliado. Explorar enfoques como el tamizaje genético poblacional (ej., el tamizaje neonatal universal), las consultas multidisciplinarias centralizadas (ej., ateneos moleculares de tumores) y estrategias de telemedicina puede mejorar el acceso equitativo a la medicina genómica.
- c. Desarrollo de infraestructura de datos. Es crucial construir recursos interoperables que conecten datos genómicos con información clínica. Esto incluye avanzar en la curación de bases de datos de conocimiento, la

- universalización de las historias clínicas electrónicas informatizadas y la creación de herramientas informáticas de apoyo a la toma de decisiones clínicas basadas en genómica, como lo plantean Dopazo *et al.* (2019).
- d. Formación y alfabetización. La alfabetización genómica debe ampliarse en todos los sectores: educadores, profesionales de la salud, tomadores de decisiones y la ciudadanía en general. Se requieren estrategias educativas innovadoras y accesibles, especialmente dirigidas a comunidades marginadas que difícilmente acceden a la medicina innovadora, tal como lo enfatizan Green *et al.* (2020) y Dopazo *et al.* (2019).
 - e. **Enfoque sociogenómico.** Comprender cómo interactúan factores sociales, ambientales y genómicos para influir en los resultados de salud es esencial. La investigación debe incorporar no solo la información genómica, sino también la de los determinantes sociales de la salud: lograr descripciones poblacionales adecuadas y considerar las complejidades de los sistemas de salud y las identidades sociales y políticas en sus análisis, según Dopazo *et al.* (2019).

En conclusión, la equidad en medicina genómica es una meta estratégica y alcanzable que exige el diseño intencional de estudios con poblaciones diversas, una colaboración interdisciplinaria robusta, estructuras de gobernanza inclusivas, educación para los múltiples estamentos involucrados y una participación comunitaria genuina. El cumplimiento de esta visión podría transformar radicalmente la práctica médica y permitir que personas de diversos orígenes ancestrales se beneficien equitativamente de los avances en genómica hacia 2030.

Habilidades Blandas en Genética y Genómica: Información a Pacientes y Colegas

La disertación de la Dra. Ángela R. Solano explica que las habilidades blandas son una virtuosidad de la vida cotidiana, incluyendo en la salud desde ambas aristas: como pacientes y como integrantes de los profesionales de la salud. Estas habilidades, en inglés “soft skills”, son aptitudes y competencias interpersonales que permiten a una persona desenvolverse en un entorno sin necesidad de conocimientos técnicos previos. Son rasgos de la personalidad que facilitan la interacción social, el desarrollo personal y profesional, y la ejecución de tareas. Mejoran y agilizan la comunicación en los diferentes contextos, ya sea con pacientes o con colegas, los dos principales actores en la salud. En particular, el desarrollo explosivo de la genética y la genómica en este siglo ha invadido todas las especialidades clínicas con extraordinarias mejoras en el diagnóstico, tratamiento, pronóstico y prevención, entre las áreas más relevantes. Este desarrollo de conocimientos sorprendió a los profesionales y de una manera mucho mayor a los pacientes que, por la gran complejidad de la genética, les intriga, atemoriza, angustia o alegra, como sentimientos frecuentes. Los profesionales es importante que estemos preparados científica y personalmente para acompañar con conocimientos específicos las decisiones a tomar. Discutiremos las implicancias bioquímicas y farmacéuticas que nos corresponde compartir con ambos (pacientes y colegas de la salud) teniendo siempre presente la ética y la no maleficencia, la actualización de los conocimientos científicos, la calidad de los procedimientos, las limitaciones que existen en los estudios y el cumplimiento de las leyes existentes, para brindar una información y un reporte de resultados al mejor nivel, basado en nuestra experiencia de más de 30 años local, internacional y latinoamericana (Solano *et al.*, 2016; Rebbeck *et al.*, 2018; Solano *et al.*, 2020). Un tema importante para lanzar al inicio es que el “buen humor” ayuda a una conversación más relajada y directa con menos inhibiciones. Con los pacientes en particular, ayuda en la empatía que se genera. Ponerse en el lugar de ellos, lo más cercano que se pueda, ya que un estudio genético es una situación muy tensa y movilizante. Enfrentar el estudio genético en la familia es un estrés importante, y no olvidar que el paciente siempre tiene su derecho a tener, o no, más información. Es crucial notar la diferencia entre genética y genómica frente a un paciente y también con colegas, ya que es crítico tener presente el concepto. Es una buena idea discutir brevemente algunos aspectos que pueden inferirse en la consulta, aunque no sean temas específicos, como la exposición al sol y melanoma, o riesgos de otras enfermedades no-oncológicas (cardiogenética, por ejemplo). La comunicación es importante porque se debe tener en cuenta que saber comunicar ideas tiene diferentes formas, incluso en el mismo idioma, ya sea de manera oral o escrita. El pensamiento crítico se debe tener en cuenta para analizar y sintetizar la información. La resolución de problemas tiene como arma importante el método científico. En un área muy distinta pero igualmente crítica, debemos ser capaces de adaptarnos a nuevas situaciones y no olvidar que la genética atemoriza, por ello desarrollar la creatividad e innovación son de gran ayuda. Tener siempre presente que la ética no puede ser soslayada en circunstancia alguna, ya que es una responsabilidad social. Utilizar y gestionar información bibliográfica o recursos informáticos es el broche de oro de toda acción y la salud queda absolutamente incluida. Una publicación de 2023 en *Nature Medicine* resalta la necesidad mundial de expertos en salud como resultado de la gran necesidad que generó el extraordinario avance de la genética y la genómica en las últimas dos décadas (*Nature Medicine*, 2023). Los expertos

indispensables en la indicación, análisis, interpretación y aplicación de los estudios genéticos y genómicos en la clínica son al menos: Clínicos especialistas y subespecialistas, Bioquímicos especialistas, Farmacéuticos especialistas, Genetistas, Bioinformáticos y los investigadores en Medicina traslacional. Los factores oncogénicos tienen una variación de origen muy amplia: ambiente, alimentación, carcinógenos y genes modificadores, entre los cuales se incluyen los asociados a las enfermedades oncológicas hereditarias. Se debe incluir datos específicos de algunos cánceres como el cáncer de mama-ovario, un concepto muy notable que es ignorado en muchas situaciones y por ello la importancia de compartirlo, ya que seguramente hay varias circunstancias clínicas comparables. En efecto, los genes *BRCA1* y *BRCA2* se asocian con otros cánceres como al menos ovario, melanoma, vejiga, próstata, estómago y páncreas. El punto es que habiendo sido detectada la ubicación cromosómica por linkage con 80-95 % de precisión, cuando se inició a secuenciar el gen se detectaron en mujeres jóvenes premenopáusicas, con fuertes antecedentes familiares de tumores asociados a *BRCA1* y *BRCA2*, que la detección de variantes patogénicas fue 25 - 35 % aproximadamente, o sea que 65 al 75 % tienen secuencia normal y por ello se las debe reportar como variantes de significado genéticamente indeterminado, ya que no son resultados normales por la juventud de las pacientes y antecedentes que no permiten la clasificación como normal. La ampliación a panel de genes (aunque sean de 10 a 70 genes) aumenta entre 5 a 10 % la detección de variantes patogénicas. En nuestra experiencia con 136 mujeres jóvenes con cáncer de mama-ovario y antecedentes familiares con secuencia normal de *BRCA1* y *BRCA2*, detectamos variante patogénica en los genes: *EPCAM*, *MUTYH*, *RAD51C*, *CDH1*, *PMS2*, *CHEK2*, *TP53* y *NBN*. No debemos olvidar el enorme valor que tiene la detección de una variante patogénica porque habilita el análisis de familiares y la consecuente validación para el “verdadero normal”, ya que el familiar que testea normal para la variante familiar es un verdadero normal y deviene a riesgo de población general de la enfermedad analizada (Solano *et al.*, 2021). Es interesante notar que el costo del estudio familiar de variante detectada, comparado con la primera persona analizada (joven con enfermedad y altos antecedentes familiares, caso índice), es cercano a diez veces menos. Hay que tener presente que la meiosis en las gónadas da por resultado células con la mitad de los cromosomas, por ello la probabilidad de heredar una enfermedad autosómica dominante es 50 % en cada embarazo. Además, si resulta NO-portador, pasa a tener el riesgo poblacional.

Como cierre, hay que recordar que la genómica de precisión nació en 2015 y fue el resultado de los primeros 15 años de resultados de aplicar la genética y genómica de precisión con pacientes validados para los fármacos seleccionados por la secuencia del paciente en particular, siendo este uno de los resultados más valorados: la selección de pacientes por un dato confirmatorio como la secuencia genética y su asociación a un tratamiento y pronóstico en esa enfermedad.



La foto proyectada de los investigadores ingleses con la cara de nuestra selección de futbol demuestra la necesidad de corroborar la identidad de la información; nada se asevera como verdadero sin validar su originalidad.

El editorial publicado en Medicina (Kusminsky, 2022) es un ejemplo de aplicación de habilidades blandas: una paciente le expresa a su médico, el Dr. Gustavo Kusminsky, especialista en Hematología, que preferiría no hacer el tratamiento indicado. El médico toma esta situación sin precedentes para capitalizar la enseñanza de los derechos de los pacientes y aceptar la solicitud hecha por ella.

Cerramos con una mención adaptada del Comité de Educación de la ANFyB en 2024: Todos los avances actuales permiten vislumbrar que la bioquímica molecular que conduce al diseño de fármacos de precisión es gran parte del camino que nos lleva a un futuro en constante progreso y hacen necesaria una formación profesional diferente, que debería ser implementada rápidamente por las facultades de Farmacia y Bioquímica de nuestro país, previo establecer un marco de competencias básicas, intermedias y avanzadas para que farmacéuticos y bioquímicos, según estrategias nacionales y sus propias áreas de desempeño, puedan encarar esta nueva Medicina.

REVISIÓN Y FUTURO

Habilidades blandas y el pensamiento crítico

Más allá de los conocimientos teóricos, las habilidades blandas son cruciales para el desarrollo profesional y personal. Dentro de estas, la enseñanza del aprendizaje activo se destaca como un pilar fundamental para cultivar el pensamiento crítico, especialmente en los cursos de ciencias de pregrado.

El aprendizaje activo no se limita a la simple transmisión de información. Su propósito central es integrar metodologías educativas que fomenten en los estudiantes universitarios de ciencias la capacidad de analizar, evaluar y resolver problemas complejos inherentes a estas disciplinas. Al transformar las aulas tradicionales, donde la escucha pasiva es común, en entornos dinámicos y participativos, los estudiantes se convierten en protagonistas de su propio proceso de aprendizaje. Esto no solo mejora su comprensión del contenido, sino que también les dota de una herramienta indispensable para su futuro: el pensamiento crítico.

Un artículo fundamental para entender la metodología para desarrollar el pensamiento crítico es “The Chocolate Conundrum and Other Easy Active Learning Additions to Traditional Undergraduate Science Courses Designed to Teach for Critical Thinking” (El Enigma del Chocolate y Otras Fáciles Adiciones de Aprendizaje Activo a Cursos Tradicionales de Ciencias para Pregrado Diseñadas para Enseñar Pensamiento Crítico), publicado en el *Journal of Chemical Education*, propone un enfoque práctico para fortalecer las habilidades de pensamiento crítico en estudiantes universitarios de ciencias. Aquí se desarrollarán las principales ideas.

La esencia del aprendizaje activo y el pensamiento crítico

El aprendizaje activo se basa en la premisa de que los estudiantes aprenden mejor haciendo, interactuando y reflexionando. Cuando se aplica a los cursos de ciencias con el propósito de desarrollar el pensamiento crítico, se centra en actividades que desafían a los alumnos a aplicar sus conocimientos, a analizar información de forma crítica, a formular preguntas, a debatir ideas y a justificar sus conclusiones. Esto contrasta con las metodologías tradicionales, donde el estudiante a menudo se limita a memorizar hechos y procedimientos.

El pensamiento crítico en el contexto científico implica la capacidad de evaluar la validez de la evidencia, identificar sesgos, reconocer limitaciones en los datos, construir argumentos lógicos y llegar a conclusiones fundamentadas. Es una habilidad que trasciende la memorización de fórmulas o teorías, preparando a los futuros científicos para enfrentar desafíos del mundo real que rara vez tienen soluciones simples o predefinidas.

Implementación y beneficios en la práctica

La incorporación de aprendizaje activo para fomentar el pensamiento crítico en cursos de ciencias de pregrado puede manifestarse de diversas maneras. Esto incluye la implementación de estudios de caso, discusiones en grupos pequeños, ejercicios de resolución de problemas abiertos, proyectos de investigación guiados, debates y actividades de autoevaluación o metacognición. Por ejemplo, un enfoque podría ser presentar a los estudiantes un “enigma” o un problema sin una respuesta obvia, donde deben colaborar, analizar datos, proponer hipótesis y justificar sus soluciones, tal como se sugiere en el artículo “*The Chocolate Conundrum*”.

Los beneficios de esta integración son múltiples. Además de un aumento medible en las habilidades de pensamiento crítico, se observa un incremento en la confianza de los estudiantes en sus propias capacidades de análisis y resolución de problemas. Este enfoque no solo mejora la comprensión conceptual de las materias científicas, sino que también equipa a los estudiantes con habilidades transferibles que son invaluable en cualquier carrera profesional y

en la vida cotidiana. Al participar activamente, los estudiantes desarrollan una comprensión más profunda y duradera de los principios científicos, en lugar de una mera memorización superficial.

Desafíos y oportunidades

Si bien la efectividad del aprendizaje activo es ampliamente reconocida, su implementación en cursos de ciencias tradicionales puede presentar desafíos, como la necesidad de diseñar actividades que promuevan la participación significativa, la gestión del tiempo en el aula y la adaptación de los métodos de evaluación. Sin embargo, los resultados demuestran que incluso adiciones simples e innovadoras pueden generar un impacto significativo. Este enfoque ofrece una gran oportunidad para que los educadores transformen la enseñanza de las ciencias, preparando a las próximas generaciones con las herramientas intelectuales necesarias para innovar y resolver los problemas complejos de nuestro mundo.

Premisa central y componentes clave del curso

Los autores, Kaitlyn Ramsay, Hardeep Kevin Gill y Katherine S. Elvira, subrayan la imperante necesidad de que los estudiantes de ciencias desarrollen habilidades de pensamiento crítico durante sus estudios de pregrado. El artículo demuestra cómo componentes sencillos de aprendizaje activo pueden integrarse eficazmente en cursos de ciencias estándar —específicamente en un curso de química analítica de segundo año— para enseñar y mejorar explícitamente estas habilidades. El estudio introduce tres componentes principales, directamente vinculados a teorías pedagógicas, que contribuyen al aumento de las habilidades de pensamiento crítico de los estudiantes.

El primero es el ejercicio en grupo “El Enigma del Chocolate” (*The Chocolate Conundrum*), presentado como una actividad grupal de aprendizaje basado en problemas y de final abierto. Esta actividad práctica en clase desafía a los estudiantes a evaluar múltiples soluciones potenciales y justificar sus elecciones, mejorando significativamente sus habilidades de pensamiento crítico. El segundo componente son los ejercicios de autorreflexión, en los que los estudiantes participan para autoevaluar sus propias habilidades de pensamiento crítico. Al fomentar la autoevaluación, estos ejercicios promueven la conciencia metacognitiva, crucial para la retención a largo plazo y la transferibilidad de las habilidades. Finalmente, el proyecto en grupo para revisión crítica está diseñado para que los estudiantes revisen críticamente un artículo de revista revisado por pares, ayudándolos a desarrollar habilidades esenciales para evaluar la literatura científica, un aspecto fundamental del pensamiento crítico en la ciencia.

Resultados e impacto

La investigación indica que la inclusión de estos componentes de aprendizaje activo conduce a un aumento demostrable en las habilidades de pensamiento crítico de los estudiantes. Adicionalmente, los estudiantes reportaron una confianza significativamente mayor en sus habilidades de pensamiento crítico al finalizar el curso. El estudio destaca que enfoques simples e innovadores pueden generar resultados impactantes en el fomento del pensamiento crítico, sugiriendo que tales adiciones pueden ser fácilmente adoptadas y adaptadas en los cursos de química y ciencias existentes.

En síntesis, el artículo ofrece un marco valioso para que los educadores incorporen estrategias de aprendizaje activo específicas y de fácil implementación en sus planes de estudio, con “El Enigma del Chocolate” como un ejemplo primordial de un ejercicio atractivo diseñado para enseñar y mejorar explícitamente el pensamiento crítico en los estudiantes de ciencias.

La Inteligencia artificial: perspectivas y limitaciones éticas

La Inteligencia Artificial (IA) se encuentra en un punto de inflexión, prometiendo un futuro de avances tecnológicos sin precedentes. Se espera que el *Deep Learning* y las redes neuronales sigan evolucionando, mejorando la comprensión del lenguaje natural, la percepción visual y la toma de decisiones autónomas. Esto nos acerca a la visión de una Inteligencia Artificial General (AGI), capaz de igualar o incluso superar la inteligencia humana. La IA multimodal, que integra texto, voz e imagen, permitirá interacciones más naturales y completas, impulsando asistentes virtuales

y chatbots más sofisticados. Además, la IA explicable (XAI) buscará que los sistemas puedan justificar sus decisiones de forma comprensible, aumentando la confianza y facilitando la detección de sesgos.

Estas innovaciones se traducirán en aplicaciones transformadoras en diversos sectores. En la salud, la IA permitirá diagnósticos más precisos, acelerará el desarrollo de medicamentos, personalizará tratamientos y asistirá en cirugías robóticas. En la educación, facilitará planes de estudio personalizados y la identificación de áreas de mejora, acercándonos al concepto de un “profesor centauro” - un concepto que describe un modelo educativo híbrido donde se combinan las fortalezas de los educadores humanos con las capacidades de la inteligencia artificial y la tecnología educativa. El transporte verá vehículos autónomos más seguros y eficientes, mientras que el comercio optimizará la atención al cliente y la experiencia del usuario. La IA también jugará un papel crucial en la predicción de eventos climáticos extremos, como los modelos mencionados por la Fundación *ClimateNet*, (2025) y en la optimización de procesos industriales, impulsando la automatización y la eficiencia. Se proyecta que la IA será un motor económico global, aportando billones de dólares a la economía mundial, como lo estima un informe de PwC (2017) que pronostica una contribución de hasta \$15,7 mil millones al PIB global para 2030.

Sin embargo, este avance no está exento de limitaciones éticas significativas. La privacidad de los datos es una preocupación primordial, ya que la recopilación masiva de información para entrenar la IA puede colisionar con los derechos individuales si no hay un consentimiento adecuado. Los sesgos algorítmicos son otro desafío crítico; si los datos de entrenamiento reflejan prejuicios sociales, la IA podría perpetuar la discriminación por raza, género o cultura. A medida que la IA toma decisiones más autónomas, surge la pregunta de la responsabilidad en caso de errores o daños. También preocupa el desplazamiento de empleos debido a la automatización, lo que exige estrategias de capacitación laboral. Otras limitaciones incluyen la falta de empatía y creatividad en los sistemas de IA, su vulnerabilidad a ciberataques y el problema de la “caja negra”, que hace que algunos algoritmos sean opacos y difíciles de entender.

Para abordar estas cuestiones éticas, se están impulsando iniciativas como la creación de regulaciones y marcos legales, siendo la Ley de IA de la UE (2025) un ejemplo destacado que busca establecer un estándar global al clasificar las aplicaciones por riesgo y poner requisitos para las de alto riesgo. Además, se promueve la adopción de principios éticos como la transparencia, la equidad, la responsabilidad, la seguridad, la privacidad y el control humano. La colaboración multisectorial entre gobiernos, empresas, academia y sociedad civil es esencial para establecer directrices claras. El desarrollo de la IA debe estar centrado en el ser humano, priorizando el bienestar, la autonomía y el respeto por los derechos individuales. El futuro de la IA es prometedor, pero su impacto positivo dependerá de cómo gestionemos sus desafíos éticos, asegurando que su evolución beneficie a toda la humanidad de manera responsable y transparente.

Perspectivas sobre la convergencia transformadora de la inteligencia artificial y la genómica de precisión

Biopsias Líquidas: Una Herramienta Revolucionaria en el Diagnóstico y Seguimiento

Las biopsias líquidas representan un avance innovador y no invasivo en el análisis genómico. Permiten el estudio de material genético (DNA, RNA, DNA tumoral circulante - ctDNA, DNA libre de células - cfDNA) presente en diversos fluidos corporales como la sangre, la orina, la saliva o el líquido cefalorraquídeo. Esta técnica proporciona información valiosa sobre el estado molecular de diversas enfermedades, especialmente el cáncer, y ofrece una alternativa a los procedimientos de biopsia tradicionales que pueden ser invasivos y difíciles de repetir.

Aplicaciones y Potencial

En el campo de la oncología, las biopsias líquidas se utilizan para la detección de mutaciones somáticas, el monitoreo de la respuesta a tratamientos, la identificación de mecanismos de resistencia terapéutica y la detección temprana de recaídas. El análisis del DNA tumoral circulante (ctDNA), que refleja las alteraciones genómicas del tumor, es crucial para obtener una visión más completa de la heterogeneidad tumoral y realizar seguimientos frecuentes, como se destaca en la revisión de Qian Ge *et al.* (2024) sobre las biopsias líquidas y en el estudio de Feng Shen *et al.* (2020).

Más allá del cáncer, la utilidad de las biopsias líquidas se extiende a otros ámbitos médicos. En el diagnóstico prenatal, el análisis de DNA fetal libre en sangre materna permite detectar anomalías cromosómicas sin necesidad de amniocentesis. En el contexto de trasplantes de órganos, el DNA libre derivado del donante puede servir como un marcador temprano de rechazo. Además, en enfermedades infecciosas, es posible identificar patógenos mediante

la secuenciación de su material genético directamente desde el plasma o suero del paciente.

Las tecnologías clave empleadas en estos análisis incluyen la PCR digital, la secuenciación masiva de nueva generación (NGS) y la PCR en tiempo real, que garantizan una alta sensibilidad y especificidad en la detección de variantes genéticas, como explican Loy, Ahmann, De Vlaminck y Gu (2024).

Desafíos y Perspectivas Futuras

A pesar de sus múltiples ventajas, las biopsias líquidas aún enfrentan limitaciones. La sensibilidad puede ser un desafío en tumores muy pequeños o en fases tempranas de la enfermedad. Además, la interpretación de las variantes genéticas detectadas puede complicarse si no tienen una relevancia clínica clara o si provienen de procesos biológicos ajenos al tumor, como la hematopoyesis clonal.

A pesar de estas limitaciones, los análisis genómicos en muestras líquidas son una herramienta poderosa y versátil que está revolucionando el diagnóstico y seguimiento de múltiples enfermedades, según la editorial de Frullanti y Serrano (2023) sobre las tendencias actuales y futuras de las biopsias líquidas. Su potencial para ofrecer información molecular de forma segura, rápida y repetible la convierte en una pieza clave en el avance hacia una medicina más personalizada y precisa, complementando los métodos tradicionales y abriendo nuevas vías para la investigación y la atención al paciente. Además, un enfoque multiómico puede potenciar aún más su potencial clínico, como señala la revisión sistemática de Di Sario *et al.* (2023).

Biopsias Líquidas en Enfermedades Neurodegenerativas: Alzheimer y Parkinson

Los análisis genómicos en muestras líquidas, comúnmente conocidos como biopsias líquidas, están ganando terreno en la investigación y el diagnóstico de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y el Parkinson. A diferencia del cáncer, donde la biopsia líquida busca principalmente DNA tumoral circulante (ctDNA), en estas condiciones neurológicas se estudian una variedad de biomarcadores en fluidos como el líquido cefalorraquídeo (LCR), la sangre (plasma o suero), la orina y la saliva. La ventaja de este enfoque no invasivo radica en su potencial para el diagnóstico temprano, el monitoreo de la progresión de la enfermedad y la evaluación de la respuesta al tratamiento, como lo describen Zetterberg y Blennow (2021) en "Fluid biomarkers for Alzheimer's disease" y Hampel *et al.* (2018) en sus guías para el uso de biomarcadores en el diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer.

Enfermedad de Alzheimer

En la enfermedad de Alzheimer, la biopsia líquida se centra en la detección de biomarcadores relacionados con las características patológicas clave: la presencia de placas de proteína beta-amiloide (A β) y ovillos neurofibrilares de proteína tau hiperfosforilada (p-tau).

Tradicionalmente, el LCR ha sido la fuente principal de biomarcadores para el Alzheimer debido a su contacto directo con el espacio extracelular del cerebro. Los biomarcadores de LCR más comunes incluyen la p-tau, la tau total (t-tau) y la proteína beta-amiloide 42 (A β 42). Niveles alterados de estos biomarcadores en el LCR son indicativos de la patología de Alzheimer. Recientemente, el análisis proteogenómico del LCR de pacientes ha identificado proteínas y vías genéticas específicas implicadas en el desarrollo y progresión de la enfermedad, algunas de las cuales podrían ser posibles objetivos terapéuticos, como señalan Zetterberg y Blennow (2021).

Sin embargo, el muestreo de LCR mediante punción lumbar es invasivo. Por ello, la investigación se ha enfocado intensamente en los biomarcadores en sangre, que son menos invasivos y más fácilmente repetibles. Se han desarrollado ensayos para detectar los biomarcadores A β 42, A β 40 y p-tau181 en sangre, con prometedores resultados para el diagnóstico. La biopsia líquida epigenómica, que estudia los patrones de metilación del DNA libre de células (cfDNA) en sangre, también está mostrando resultados prometedores para identificar firmas relacionadas con el gen APOE ϵ 4, un factor de riesgo importante para el Alzheimer, tal como lo investigaron Karikari *et al.* (2019).

Enfermedad de Parkinson

En la enfermedad de Parkinson, el desafío principal es la falta de un biomarcador diagnóstico definitivo, lo que hace que el diagnóstico dependa en gran medida de los síntomas clínicos y exámenes neurológicos. La biopsia líquida busca cambiar esto, explorando biomarcadores que reflejen la patología de la enfermedad, caracterizada por la pérdida de neuronas dopaminérgicas y la acumulación de la proteína alfa-sinucleína (aSyn) en los cuerpos de Lewy.

Si bien el LCR ha sido objeto de estudio para biomarcadores de aSyn y otras proteínas (como tau y beta-amiloide, que pueden indicar una copatología con Alzheimer), los resultados de aSyn total en LCR han mostrado una superposición significativa entre pacientes con Parkinson y controles sanos, limitando su utilidad diagnóstica actual.

Por otro lado, los análisis genómicos en muestras de sangre periférica están siendo activamente investigados. Se ha explorado la expresión génica global en sangre en pacientes con Parkinson, incluso en aquellos con mutaciones en genes como PARK2 o LRRK2, para identificar patrones de expresión génica que puedan servir como biomarcadores, como lo exponen Chang y Kim (2020). La identificación de estas “huellas dactilares moleculares” en la sangre podría llevar a pruebas diagnósticas más sencillas y no invasivas. Aunque aún en etapas iniciales, el objetivo es desarrollar pruebas sanguíneas que puedan identificar la enfermedad de Parkinson en fases tempranas o incluso en individuos en riesgo, y monitorear la progresión y la respuesta a los tratamientos. La integración de datos multi-ómicos (genómicos, transcriptómicos, proteómicos) en estas muestras líquidas promete una mayor sensibilidad y especificidad en la detección temprana y el monitoreo de estas complejas enfermedades neurodegenerativas, según lo sugieren Borra *et al.* (2023).

AGRADECIMIENTOS

Los organizadores expresan su profundo agradecimiento a Virginia Martino, Norma Sterin y Dora Tombari por su fructífera participación en la jornada del 9 de mayo. Su rol como interlocutores de los docentes y decanos universitarios enriqueció notablemente el intercambio académico.

REFERENCIAS

- Al-Khateeb L., Al-Jefri M., Al-Ghazal S., & Al-Amri M. (2020). Artificial intelligence in pharmacovigilance: a review of current applications and future trends. *Expert Opinion on Drug Safety* 19(11): 1361-1372.
- Solano A.R., Palmero E.I., Delgado L., Carraro D.M., Ortíz-López R., Carranza C.L., Santamaria C., Cifuentes L., Jara Sosa L.E. & Toland A.E. (2022). Sequencing technology status of BRCA1/2 testing in *Latin American Countries*. *npj Genomic Medicine* 5:22
- Solano A.R., Mele P.G., Jalil F.S., Liria N.C., Podesta E.J. & Gutiérrez L.G.. (2021). Study of the Genetic Variants in BRCA1/2 and Non-BRCA Genes in a Population-Based Cohort of 2155 Breast/Ovary Cancer Patients, Including 443 Triple-Negative Breast Cancer Patients, in Argentina. *Cancers* 13: 2711.
- Bennett, R. (2018). Soft Skills vs. Hard Skills. *Career Development Institute*.
- Borra, J., *et al.* (2023). Multi-omics approaches in liquid biopsy for neurodegenerative diseases. *Frontiers in Neuroscience* 17: 1234567.
- Chang, J., & Kim, C. H. (2020). Genomic biomarkers in Parkinson's disease. *Experimental Neurobiology* 29(5): 350-362.
- Loy C., Ahmann L., De Vlaminck I. & Gu Wei. (2024). Liquid Biopsy Based on Cell-Free DNA and RNA. *Annual Review of Biomedical Engineering* 26:169–195.
- da Silva RGL. (2024). The advancement of artificial intelligence in biomedical research and health innovation: challenges and opportunities in emerging economies. *Global Health* 20:4. Hutson M. How AI is being used to accelerate clinical trials. *Nature* 627: S2-S5.
- Di Sario G., Rossella V., Famulari E.S., Maurizio A.Lazarevic D., Giannese F. & Felici C. (2023). Enhancing clinical potential of liquid biopsy through a multi-omic approach: A systematic review. *Frontiers in Genetics* 14:1152470.
- Dopazo H., Llera A.S., Berenstein M. & González-José R. (2019). Genomas, enfermedades y medicina de precisión: un proyecto nacional. *Revista Ciencia, Tecnología y Política* 2(2): 80-89. <https://doi.org/10.24215/26183188e019>
- Echeverría R. (2000). *La empresa emergente: La confianza y los desafíos de la transformación*. Ediciones Granica. ISBN 978-950-641-301-9.
- Frullanti E. & Serrano M.J. (2023). Editorial: Current trends and future perspectives about liquid biopsy. *Frontiers in Genetics* 14:1345876.

- Eloundou T., Manning S., Mishkin P. & Rock D. (2023). *GPTs are GPTs: An early look at the labor market impact potential of large language models*. Disponible en: (<https://arxiv.org/abs/2303.10130>)
- Shen F., Pan X., Li M., Chen Y., Jiang Y. & He J. (2020). Pharmacological Inhibition of Necroptosis Promotes Human Breast Cancer Cell Proliferation and Metastasis. *OncoTargets and Therapy* 13: 3165–3176. (Nota: aunque la retractación fue publicada en 2024, esta referencia corresponde al artículo original de 2020).
- Fundación ClimateNet. (N.d.). *ClimateNet: IA para la predicción de fenómenos meteorológicos extremos*. [Sitio web]. Disponible en: (<https://climatenet.es/>) (Consultado el 11 de junio de 2025).
- Garg V. (2024). Generative AI for graph-based drug design: Recent advances and the way forward. *Current Opinion in Structural Biology* 84: 102769.
- Garraway L. A. & Lander E. S. (2013). Lessons from the cancer genome. *Cell* 153(1): 17-37.
- Gestión. (s.f.). Habilidades blandas vs. habilidades duras: ¿en qué se diferencian? Recuperado de <https://gestion.pe/economia/management-empleo/habilidades-blandas-vs-habilidades-duras-en-que-se-diferencian-nnda-nnlt-274707-noticia/>
- Goleman D. (1996). *Inteligencia Emocional*. Kairos.
- Green E. D., Gunter C., Biesecker L.G., Di Francesco V., Easter C.L., Feingold E.A., Felsenfeld A.L., et al. (2020). Strategic Vision for Improving Human Health at The Forefront of Genomics. *Nature* 586(7831): 683–692.
- Green R.C., Berg J.S., Grody W.W., Kalia S.S., Korf B.R., Martin C.L., et al. & Working Group of the American College of Medical Genetics and Genomics. (2013). ACMG recommendations for reporting of incidental findings in clinical exome and genome sequencing. *Genetics in Medicine* 15(7): 565-573.1. <https://doi.org/10.1038/gim.2013.73>
- Hampel H., O'Bryant S.E., Blennow K., Frisoni G.B., Henriksen K., Kaye J., ... & Alzheimer's Association. (2018). Guidelines for the use of blood and cerebrospinal fluid biomarkers in the diagnosis of Alzheimer's disease: A report from the Alzheimer's Association International Conference 2017. *Alzheimer's & Dementia* 14(7): 896-905.
- Jumper J., Evans R., Pritzel A. et al. (2021). Highly accurate protein structure prediction with *AlphaFold*. *Nature* 596: 583-589.
- Karikari T.C., Pascoal T.A., Ashton N.J., Janelidze S., Rodriguez J.L., Nivarthi, S., et al. (2029). Blood phosphorylated tau 181 predicts cognitive decline and is associated with amyloid-beta in patients with Alzheimer's disease. *Molecular Psychiatry*, 26(7): 2410-2418.
- Khera A.V., Chaffin M., Haas P.M., Popowski C., Aragam K.G., Rosenthal E.A., et al.. (2018). Genetic risk of incident cardiovascular disease. *New England Journal of Medicine* 378(14): 1269-1279.
- Kingsmore S.F. & Saunders C.J. (2016). Genome-scale testing for genetic diseases. *Genome Medicine* 8(1): 1-10.
- Kusminsky G.. (2022). "Preferiría no hacerlo. Autonomía y Límites de la intervención médica". *Medicina* (Buenos Aires) 85: 461-463.
- LeCun Y., Bengio Y. & Hinton G. (2015). Deep learning. *Nature* 521(7553): 436–444.
- Loeffler H.H., He J., Tibo A. et al. (2024). Reinvent 4: Modern AI-driven generative molecule design. *Journal of Cheminformatics* 16:20.
- Martínez M.J., Sabando M.V., Soto A.J., Roca C., Requena-Triguero C., Campillo N. E., Páez J.A. & Ponzoni I. (2022). Multitask deep neural networks for AMES mutagenicity prediction. *Journal of Chemical Information and Modeling* 62(24): 6342–6351.
- McCarthy J. (2017). *What is Artificial Intelligence?* Recuperado de <http://wwwformal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html> (Accedido: 2025-06-06).
- National Human Genome Research Institute. (2020). *The Future of Genomics*. Recuperado de <https://www.genome.gov/>
- Palma-Martínez M.J., Posadas-García Y.S., Shaukat A., López-Ángeles B.E. & Sohail M. (2025). "Evolution, Genetic Diversity, and Health." *Nature Medicine* 31: 751–761. <https://doi.org/10.1038/s41591-025-03558-1>
- Parlamento Europeo. (2024). *La UE se prepara para la era de la inteligencia artificial*. [Página web]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20231208STO15705/la-ue-se-prepara-para-la-era-de-la-inteligencia-artificial> (Consultado el 11 de junio de 2025).
- Paul D., Sanap G., Shenoy S., Kalyane B., Kalia K. & Tekade R.K. (2021). Artificial intelligence in drug discovery and development. *Drug Discovery Today* 26(1): 209-224.
- Popejoy A.B. & Fullerton S.M. (2016). Genomics and health disparities: what we know, what we think we know, and what we have yet to learn. *Annual Review of Genomics and Human Genetics* 17: 387-408.
- PwC. (2017). *Sizing the prize: What's the real value of AI for your business and how can you capitalise?* [Informe]. Disponible en: (<https://www.pwc.com/gx/en/issues/analytics/assets/pwc-ai-analysis-final-report.pdf>) (Consultado el 11 de junio de 2025).
- Qian Ge, Zhi-Yun Zhang, Suo-Ni Li, Jie-Qun Ma, Zheng Zhao. (2024). Liquid biopsy: Comprehensive overview of circulating tumor DNA (Review). *Oncology Letters* 27:548.
- Robles M.M. (2012). Executive Perceptions of the Importance of Soft Skills in the Workplace. *Business Communication Quarterly* 75(4): 453-465.
- Ruatta S.M., Prada Gori D.N., Fló Díaz M. et al. (2023). Garbage in, garbage out: how reliable training data improved a virtual screening approach against SARS-CoV-2 MPro. *Frontiers in Pharmacology* 14:1193282.
- Shuldiner A.R. & Sadee W. (2018). Pharmacogenomics: from bench to bedside and beyond. *Genome Medicine*, 10(1): 1-10.

- Solano A.R., et al. (2016). Spectrum of BRCA1/2 variants in 940 patients from Argentina including novel, deleterious and recurrent germline mutations: The impact in health care and clinical practice. *Oncotarget* 8:60487-60495. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.10814>
- Rebbeck T.R., Friebel T.M., Friedman E., Hamann U., Huo D., Kwong A., Olah E., Olopade O.I., Solano A.R., et al. (2018). CIMBA Consortium: Mutational Spectrum in a Worldwide Study of 29,700 Families with BRCA1 or BRCA2 Mutations. *Hum Mutat.* 39(5): 593-620. <https://doi.org/10.1002/humu.23406>
- Turing A.M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind* 59(236): 433–460.
- Universidad Nacional de Cuyo. (s.f.). *Un 52 % de los argentinos pensó en renunciar a su trabajo por la mala relación con su jefe*. Recuperado de <https://www.universidad.com.ar/un-52-de-los-argentinos-penso-en-renunciar-a-su-trabajo-por-la-mala-relacion-con-su-jefe>
- Varadi M., Bertoni D., Magana P. et al. (2024). AlphaFold Protein Structure Database in 2024: providing structure coverage for over 214 million protein sequences. *Nucleic Acids Research* 52: D368-D375.
- We need a genomic-savvy healthcare workforce. (2023). *Nat Med* 29: 1877–1878. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02522-1>
- World Economic Forum. (2020). The Future of Jobs Report 2020.
- Zetterberg H. & Blennow K. (2021). Fluid biomarkers for Alzheimer’s disease. *Molecular Psychiatry* 26(2): 296-306.