

Presente y futuro de la cirugía robótica

• Dr. Richard Satava¹

Resumen

Desde el advenimiento de la cirugía mínimamente invasiva han existido nuevos descubrimientos en robótica para realizar telecirugía en la realidad virtual y en los simuladores quirúrgicos para la educación de los cirujanos, además de muchas nuevas tecnologías emergentes que revolucionarán lo que será el futuro de la cirugía. El presente artículo es una revisión de los más recientes avances en estos campos de las tecnologías disruptivas, y las implicaciones de las nuevas tecnologías radicales emergentes en el largo plazo.

Introducción

Aunque muchos factores, como los económicos, la atención médica gestionada por intermediarios y la regulación contribuyen al cambiante panorama de la cirugía, nada causa un cambio tan dramático como la introducción de una tecnología revolucionaria. El cambio es tan rápido que un término nuevo, la “tecnología disruptiva”, ha sido acuñado para indicar un cambio tan abrupto y radical en un tiempo corto. El entrenador de baseball norteamericano, Yogi Berra, muy agudamente se anticipó a tales cambios cuando dijo: “¡El futuro ya no es lo que era antes!”. La implicación, por supuesto, es que no podemos juzgar los cambios futuros utilizando los estándares contemporáneos. La cirugía laparoscópica fue la primera de dichas tecnologías y muchas otras habrán de seguir pronto. La robótica está apenas haciendo su aparición en escena, junto con la realidad virtual para simular cirugías y muchas otras que están actualmente en el laboratorio.

El siguiente artículo es una revisión del estado actual de la robótica, la telecirugía y los simuladores quirúrgicos, así como una introducción a otras numerosas tecnologías nuevas que podrán impactar significativamente en la práctica de la cirugía. La velocidad vertiginosa de tales cambios tecnológicos está generando una extraordinaria revolución social, del comportamiento y la ética, de tal manera que se justifica la especulación sobre sus efectos profundos.

Cirugía en la Era de la Información

Antes de examinar las tecnologías específicas, es importante proporcionar el marco de referencia para un cambio de tal magnitud. Este cambio radical es un reflejo de las tecnologías de la Era de la Información, tales como las computadoras, los robots y la realidad virtual. No obstante, existen algunos principios subyacentes que deben ser entendidos, puesto que es esta “perspectiva de la Era de la Información” la que no sólo impulsa el cambio, sino que lo aglutina todo.

Este primer principio es en el que podemos representar los objetos reales del mundo real con una computadora o un equivalente informático (esta es la analogía de Nicholas Negroponte “Bits en lugar de átomos”).¹ Por ejemplo, el cuerpo en el mundo real y una imagen por tomografía computarizada del cuerpo en el mundo de la informática. A esa imagen total del cuerpo se agregan todos los signos vitales, la mecánica, la fisiología, entre otros, de una persona individual. El resultado es una representación de la información, una representación holográfica médica electrónica (u holómero)² de una persona, que es un sustituto del paciente o persona en “espacio” infor-

¹ Profesor de Cirugía del Centro Médico de la Universidad de Washington Seattle, WA, Estados Unidos.

mático (computadora), y que permite hacer simulaciones sobre la imagen antes de realmente ofrecer un diagnóstico o tratamiento médico a la persona (ver más adelante).

El ejército de los Estados Unidos tiene un proyecto para probar el concepto llamado Soldado Virtual, en el cual una tomografía computarizada (TC) de un soldado se usa para representar al soldado. Al llevar esta imagen en su placa de identificación electrónica, en caso de que el soldado resulte herido, el personal médico o cirujano tendrá una imagen de cómo era el soldado cuando estaba bien. Una comparación con el soldado después de la herida le permite al cirujano diagnosticar los cambios ocurridos. Sin embargo, en la ausencia de un cirujano, el personal médico puede usar un programa computacional para automáticamente detectar la diferencia y realizar el diagnóstico por él. Esto es un proyecto tan escalofriante que está apenas en sus fases iniciales para crear un holómero de un corazón que se comporta totalmente como un corazón natural.

Existe un gran debate con respecto al valor de una "tomografía total del cuerpo" (holómero) de una persona, que va desde el riesgo teórico de cáncer debido a la exposición a la radiación hasta el problema práctico del gasto económico en la realización de muchas más pruebas y exámenes en caso de descubrirse alguna anomalía. Sin embargo, estos argumentos pasan por alto el punto principal: el propósito de obtener una tomografía *no* es descubrir la enfermedad, sino que su mejor uso es cuando el paciente está joven y asintomático para dar una línea basal (en términos científicos, un "control en la normalidad"). Así, cuando una persona se enferma habrá un conjunto de datos disponibles (una imagen) de su estado saludable normal para hacer comparaciones. La medicina clínica con frecuencia pretende ser científica. La ciencia verdadera exige un rígido apego al método científico. La premisa básica es que existe un control mediante el cual se compara un cambio. Sin embargo, sin un holómero no tenemos el brazo de control y por lo tanto no siempre estamos realizando una verdadera medicina basada en evidencia.

La medicina basada en la evidencia es un importante avance para la medicina aplicada científicamente. La autopsia es una medida importante para confirmar nuestros diagnósticos en pacientes que han muerto. Por numerosas razones, el número de autopsias está decreciendo drásticamente, menos del 10% de todas las muertes en hospitales están siendo confirmadas

por este examen.³ Thali, et al. introdujeron un nuevo concepto tecnológico, la Autopsia Virtual, que es una imagen tomográfica completa del cuerpo del difunto.⁴ Un proyecto adicional del ejército, la Autopsia Virtual realiza barridos completos del cuerpo entero después de que un soldado muere en acción, y se utiliza para asistir al patólogo durante la autopsia real. Tener la imagenología de la Autopsia Virtual a su disposición ha reducido el tiempo de la autopsia en un 30% y ha incrementado la recuperación de evidencia forense (fragmentos de metal) del 60% al 85%.⁵ Pero lo más importante es que con la imagen es posible calcular e inferir muchos hechos importantes del tracto de la herida, la posición del fragmento, entre otros, que no son posibles en la autopsia real.

Nueva información se puede derivar del análisis de la imagen como: qué áreas del cuerpo fueron protegidas por los chalecos antibalas, las armaduras, cómo debe rediseñarse la armadura, de qué dirección provenían las balas, cuál era la velocidad de las balas y qué tan lejos estaba el enemigo. Curiosamente, este tipo de análisis ha sido común durante décadas en todas las demás industrias, excepto en la atención a la salud. Los científicos e ingenieros tienen una representación computarizada (o información) de su producto (en atención a la salud el "producto" es el paciente). Por lo tanto, es posible hacer modelos, simulaciones, prototipos virtuales, pruebas y evaluaciones virtuales, ensayos mecánicos y muchas otras técnicas en el modelo computarizado, incluso antes de construir u operar su producto. La atención a la salud podría tener una oportunidad si se tomara una imagen total del cuerpo del paciente.

Robótica y telecirugía

Otro importante aspecto de la Era de la Información es mirar nuestros dispositivos e instrumentos como "representaciones de información". Por ejemplo, un robot no es una máquina, es un sistema de información con brazos y piernas; un tomógrafo no es un sistema de imagenología digital, sino un sistema de información con ojos y demás.⁶ La importancia es que ahora casi todo lo que hacemos como cirujanos se puede considerar como "información". Un ejemplo específico es la cirugía robótica. La cirugía laparoscópica está a la mitad del camino para convertirse en cirugía robótica. No vemos a los órganos de una persona (el mundo real) sino que miramos a un monitor de video, que es una representación computarizada (información) de los órganos. Sin embargo, en la laparoscopia manipulamos los tejidos con instrumen-

tos reales. En contraste, un robot también utiliza un monitor de video, pero cuando el cirujano mueve las manijas pasan señales electrónicas por la computadora a las puntas de los instrumentos. La cirugía se ha convertido en una forma de administración de la información.

Este es un concepto sumamente importante, porque usando esta perspectiva es posible integrar la cirugía como nunca antes. Desde la consola quirúrgica robótica, el cirujano puede realizar cirugía abierta, cirugía mínimamente invasiva, y además, cirugía remota (tele cirugía). Al importar la imagen tomográfica del paciente u órgano, el cirujano puede preplanear la operación e incluso hacer un ensayo quirúrgico del procedimiento, puede cometer con seguridad errores en la imagen en lugar de en el paciente. Al realizar la fusión de datos de la TC con la imagen de video real es posible tener una ayuda para la navegación intraoperatoria para la cirugía guiada por imágenes, y al usar imágenes de órganos en realidad virtual generadas por computadora, se pueden realizar simulaciones quirúrgicas para el entrenamiento y la evaluación. Todos estos diferentes aspectos de la cirugía que actualmente se realizan en diferentes momentos y en diferentes lugares ahora se pueden hacer juntos desde un único punto: la consola quirúrgica. Esto permite la integración de la cirugía a un nivel que antes no era posible. En esta integración –un enfoque sistémico– está el verdadero poder de la cirugía robótica.

Las ventajas mecánicas de la cirugía robótica han sido enumeradas con frecuencia: un incremento en la precisión de los movimientos de la mano, eliminación del temblor del movimiento de la mano, vista ampliada, mejora en la destreza y cirugía remota. La primera operación de telecirugía fue realizada por el Profesor Jacques Marescaux de Estrasburgo, Francia, en septiembre de 2001;⁷ y el Dr. Mehran Anvari⁸ de la Universidad McMaster de Hamilton, Ontario, Canadá está realizando una cirugía robótica avanzada en North Bay, Canadá, a aproximadamente 300 km de distancia. Aunque es posible lograr una cirugía de esta naturaleza, no siempre es factible, puesto que en las ciudades más grandes es donde existen muchos hospitales con los especialistas a su disposición.

“Instrumentos” quirúrgicos futuros

La mayoría de los instrumentos quirúrgicos son mecánicos, aunque también existen algunos como la electrocoagulación, la ablación por radiofrecuencia

y la crioterapia. Esto muestra una nueva tendencia, que es la de reemplazar los instrumentos mecánicos con sistemas de energía. Un nuevo ejemplo muy innovador es el ultrasonido. El sistema de diagnóstico por ultrasonido Sonosiste 180 está disponible en la actualidad. Se están realizando investigaciones para agregarle al sistema ultra sonido enfocado de alta intensidad (HIFU por las siglas en inglés de High Intensity Focused Ultra Sound). Cuando dos haces de ultrasonido idénticos se enfocan para intersectarse, otras interacciones armónicas ocurren, las cuales generan calor. Dependiendo de la frecuencia, potencia, entre otros, el calor puede ser generado ya sea para coagular el tejido y la sangre o para vaporizarlo. Se están realizando estudios clínicos en áreas como: fibromas uterinos, cáncer prostático, lesiones benignas de glándula mamaria y lesiones hepáticas. Al combinar el HIFU con el ultrasonido diagnóstico será posible utilizar el Doppler para diagnosticar la fuente de un sangrado, enfocar el HIUF y detener la hemorragia –todo desde afuera del cuerpo. Las investigaciones con animales han tenido éxito para detener hemorragias de las arterias femorales en forma no quirúrgica, al igual que en órganos macizos tales como el hígado, riñón y bazo.⁹

Es probable que más y más instrumentos dirigidos por la energía, como los láser, la radiofrecuencia, la crioterapia, el ultrasonido, entre otros, emergerán y tendrán posibilidades tanto diagnósticas como terapéuticas, lo que permitirá al cirujano hacer un diagnóstico y luego realizar el tratamiento. Otro instrumento llamado “bisturí inteligente” está siendo investigado con los militares para crear un bisturí de láser que “escanee” los tejidos frente al láser de corte para diagnosticar si hay vasos sanguíneos en el área y, de ser así, el láser automáticamente se apaga para no cortar los vasos sanguíneos mayores. La siguiente generación intentará distinguir entre el tejido normal y canceroso para coadyuvar en oncocirugía.

Terapia crítica para trauma y cirugía

Durante décadas, la milicia ha estado utilizando un nuevo sistema llamado LSTAT (por las siglas en inglés de Life Support for Trauma and Transport; Sistema de Transporte y Terapia Intensiva) que tiene todas las capacidades de una sala de terapia intensiva reducida a una plataforma de 6 pulgadas que se coloca debajo de una camilla estándar.¹⁰ Además tiene capacidades completas para telemedicina. Desde el año 2000 en la guerra de Bosnia y Kosovo, la milicia ha estado utilizando el LSTAT para los heridos. La Figura 1

representa un escenario típico: El soldado herido es colocado en el LSTAT inmediatamente después de la herida y el cirujano en el MASH (por las siglas en inglés del puesto médico militar más cercano) recibe información sobre el herido. Desde el helicóptero a la ambulancia en el helipuerto, hasta el módulo de triaje, el cirujano sigue monitorizando al herido, cambiando el respirador, los líquidos intravenosos, entre otros, según sea necesario. El paciente es trasladado al quirófano y después de la cirugía a la sala de recuperación en el LSTAT, mientras que todo el tiempo el cirujano está monitorizándolo y se está llevando un registro completo de todo. Durante el episodio entero, el cirujano ha estado totalmente informado y está completamente a cargo, lo cual es otra forma de integración total de la atención quirúrgica mediante el manejo de información. Los LSTATs de la siguiente generación serán más ligeros en cuanto a peso, con componentes intercambiables sin necesidad de apagar el dispositivo, e incluso con una versión portátil que cabe en una mochila que se puede llevar en la espalda.

En la atención traumática militar, una evacuación médica rápida ha sido una contribución importante a la mejora en la supervivencia de los heridos en el campo de batalla. Hay un nuevo énfasis en la milicia sobre los vehículos aéreos sin tripular (UAV por las siglas en inglés de Unmanned Air Vehicles), y el más reciente esfuerzo será reemplazar camiones y otros vehículos de la cadena de suministros con un nuevo cuerpo de UAVs para reabasto. La gran mayoría de las evacuaciones médicas ocurren sobre “vehículos de oportunidad”, como los Vehículos Multipropósito de Alta Movilidad con Ruedas (HMMWV por sus siglas en inglés) y los camiones de 2 y media toneladas. Con el nuevo abasto de UAVs, próximos a ser distribuidos ubicuamente por todo el campo de batalla, será posible que la mayoría de las evacuaciones médicas ocurran con el tiempo en unidades UAV, así que la siguiente generación de reabasto de UAVs está diseñándose para incorporar plataformas de LSTAT, para convertir, en esencia, a cualquier IAV vacío en un vehículo medevac completamente capaz y autónomo.

Figura 1



Educación y entrenamiento

El entrenamiento en habilidades quirúrgicas y la certificación quirúrgica no ha cambiado mucho en siglos. Sin embargo, recientemente las tecnologías de simulación en aviación que comenzaron en la década de 1950 se han hecho ultra realistas, y han hecho la transición hacia la cirugía (hicieron su primera aparición en la década de 1990) en simulación quirúrgica.¹¹ Al utilizar la realidad virtual y el crecimiento exponencial de las computadoras, se ha hecho un avance rápido hasta el punto en que la simulación quirúrgica se está haciendo cada vez más realista e incluso portátil. Los modernos principios de aprendizaje para adultos, aunados a nuevas metodologías para la evaluación objetiva, han traído la simulación de habilidades quirúrgicas al siglo XXI. Sistemas sofisticados, tales como el dragón rojo y el dragón azul proporcionan mediciones precisas de los movimientos de la mano, fuerzas, dirección, entre otros. Esto produce como resultado una "firma" cuantificable de evaluación de habilidades que con toda exactitud distingue el desempeño de un novato y de un experto y que ofrece información cuantificable sobre cómo mejorar el desempeño.¹² Con la habilidad para cuantificar precisamente el desempeño, los simuladores de siguiente generación incorporarán el desempeño de expertos como criterios de parangón (benchmark) que los estudiantes tendrán que alcanzar.

Los programas de entrenamiento ya están cambiando, del basado en la cronología al entrenamiento sustentado en criterios de pericia; el estudiante ya no se entrena por un tiempo determinado y luego comienza a operar, sino que el estudiante sigue entrenándose en el simulador hasta lograr el criterio de parangón, de un experto antes de operar en su primer paciente. Esto dramáticamente reduce la cantidad de tiempo que el estudiante "practica" con el paciente. El estudio de la Universidad de Yale demostró que el entrenamiento basado en criterios en un simulador puede reducir el tiempo de operación en un 30% y disminuir los errores en 85%.¹³

Cirugía sin incisiones

El progreso desde la cirugía abierta a la mínimamente invasiva ha mejorado dramáticamente la recuperación y resultados del paciente, debido en gran medida a la reducción de las incisiones de muy grandes a extremadamente diminutas. Existen investigaciones actuales sobre la eliminación total de las incisiones mediante la inserción de instrumentos por los orifi-

cios naturales -Cirugía Endoscópica Transluminal por Orificios Naturales o NOTES (por sus siglas en inglés)- como la boca, la vagina, el ano, entre otros.¹⁴ Esto requiere modificar los instrumentos endoscópicos flexibles de la actualidad. La más común es la transgástrica, donde un endoscopio flexible es insertado en el estómago y se hace una incisión en el estómago de manera que el endoscopio pueda ser pasado a la cavidad peritoneal. Entonces el procedimiento quirúrgico, como una apendicetomía, una colecistectomía, entre otras, se realiza más o menos como una laparoscopia, pero con instrumentos flexibles largos. Al terminar, se recupera el espécimen por el estómago y la boca, y se cierra la incisión en el estómago. Se están diseñando nuevos instrumentos para mejorar este nuevo enfoque, incluyendo innovadores dispositivos para suturar.

El atributo más importante de este nuevo enfoque no será el uso de los orificios naturales, o si habrá mejoras significativas para el paciente más allá de los procedimientos laparoscópicos actuales. El éxito deberá ser determinado por los resultados del paciente. Al igual que en la laparoscopia, si se dan los éxitos iniciales, no habrá modo de predecir cuántas cirugías se podrán realizar por esta ruta.

El quirófano del futuro

Con los rápidos cambios en robótica, computadoras y realidad virtual, es claro que el lugar en el que se realizarán los procedimientos quirúrgicos deberá cambiar. Las nuevas tecnologías requieren un nuevo enfoque. Hasta ahora, la sala de operaciones ha sido un espacio vacío lleno de útiles, muebles (mesas, monitores), máquinas de anestesia, luces, entre otros. Todo este equipo es pasivo, independiente y no interoperable. El siguiente paso es la integración de todos los aspectos del quirófano, no sólo para el procedimiento quirúrgico, durante todo el período perioperatorio, desde el momento en que el paciente entra al área de preparación preoperatoria hasta que finalmente se les descarga al área de recuperación. Como cualquier otra cosa, es una integración de la información sobre el paciente, el procedimiento, los procesos, el flujo de trabajo, entre otros. Los nuevos principios de negocios, como la administración de la cadena de suministros, rastreo de activos, inventario justo a tiempo, entre otros, deben ser atributos estándares en el procedimiento quirúrgico entero.¹⁵

El acceso a la información, como los datos de laboratorio, imágenes, entre otros, se tendrá disponible en

la punta de los dedos del cirujano y desplegada en los mismos monitores del procedimiento quirúrgico o al lado de ellos. Pueden surgir nuevos conceptos de nuevas tecnologías, tales como el “quirófano sin luces”, en el cual el techo tiene empotrados miles de diodos emisores de luz (LEDs) en el techo que sustituyen la lámpara convencional, lo que permitirá una completa iluminación del quirófano, pero sin obstruir los haces de luz.¹⁶ Tal vez, miles de camaritas miniaturas de bajo costo también serán empotradas para permitir el registro, rastreo, manejo del flujo de trabajo, entre otros. En esencia, el techo se convertirá en un “mar inteligente de cámaras y luces” para participar activamente en el procedimiento, en lugar de simplemente crear un espacio pasivo.

También es importante mirar hacia la industria para inspirarse en cuanto al rumbo potencial de la cirugía, especialmente las nuevas tecnologías, incluyendo la robótica. Hoy por hoy, los cirujanos se sientan en estaciones de trabajo robóticas, pero las enfermeras instrumentistas cambian los instrumentos mientras que las circulantes traen los materiales necesarios. No obstante, en la industria cuando se cambia un instrumento se utiliza un cambiador automático de herramientas, o cuando se usa algún material nuevo se utiliza un expendedor de materiales –no hay personas interactuando con los robots. Michael Treat de la Universidad de Columbia¹⁷ ha diseñado una enfermera instrumentista robótica que responde correctamente a las peticiones verbales, pone el instrumento necesario en manos del cirujano y recoge y regresa el instrumento usado a la bandeja quirúrgica. Esto es un peldaño hacia un quirófano completamente automatizado –la sala de operaciones sin gente.

El siguiente es un concepto sugerido, donde el financiamiento inicial para la investigación está corriendo por cuenta de la milicia.

Se trae al paciente al área de espera, se le coloca en la posición correspondiente a la cirugía y se le anestesia. Se hace un “scan” total del cuerpo y mientras el paciente es trasladado a la sala de operaciones, el cirujano ensaya el procedimiento quirúrgico en la estación de trabajo, en donde puede cometer errores en la imagen del paciente, no en el paciente. Cuando se está operando, cada vez que se cambia un instrumento o se usa un material ocurren tres cosas: al paciente se le factura, se manda una solicitud de reabastecimiento a la sala de operaciones y se envía una orden para el reemplazo, todo dentro de 50 milisegundos con un 99.99% de precisión, lo cual es el estándar de

la industria. Este tipo de escenario tiene importantes ventajas, especialmente en eficiencia y reducción de personal. Reemplazar una enfermera instrumentista y una circulante durante el procedimiento reduciría costos, liberaría a las enfermeras para las tareas perioratorias con los pacientes, que son más importantes que estar recogiendo y colocando instrumentos y materiales, permitiría estandarizar la rendición de cuentas mediante el rastreo automático de instrumentos y materiales, y muchas otras mejoras al flujo de trabajo.

Sin embargo, ¿está un escenario así apuntando hacia un futuro en el cual los robots reemplazarán a los cirujanos? Es poco probable, aunque, si de nuevo recurrimos a la aviación y a los militares, sí existen analogías. Hasta el año 2002 los pilotos de aviones de guerra, al igual que los cirujanos, eran de quienes dependía el desempeño. Luego llegaron las UAV, tales como el Predator. Inicialmente se usaron para reconocimientos, luego para misiones de búsqueda y localización, ahora ya se usan en combate. El ejército está totalmente comprometido a cambiar todos los aviones de guerra por UAV para el año 2025, e incluso hay una nueva escuela de la Fuerza Aérea para Entrenamiento de Pilotos Remotos (pilotos que nunca se suben a una aeronave pero la controlan las UAV en forma remota). ¿Existirá aquí una lección para los cirujanos?

Robots móviles

Además de los robots de quirófano, se está introduciendo una diversidad de robots móviles. El robot móvil de telemedicina RP-6 de In-Touch, Inc., de Goleta CA es una plataforma robótica con un monitor plano apoyado por una conexión de telemedicina.¹⁸ La enfermera puede ir con el robot en sus rondas y el paciente puede ver al doctor y conversar con él a través del enlace de telemedicina. La aceptación de esta nueva tecnología ha sido sorprendentemente buena, particularmente en las casas hogar donde los médicos no tienen mucho tiempo para hacer rondas. Al entrevistárseles, los pacientes dicen que se acostumbra rápidamente a ver a su doctor en el monitor de video y frecuentemente prefieren este método de comunicación porque el cirujano les dedica más tiempo y tiene mejor contacto visual con el paciente, lo cual es un resultado bastante sorprendente de esta encuesta. O quizá es un triste comentario de cuán ocupados han de estar los cirujanos de la actualidad, están corriendo por sus rondas y pierden el importantísimo valor de la atención personal al paciente.

Tecnologías avanzadas más allá de la práctica actual

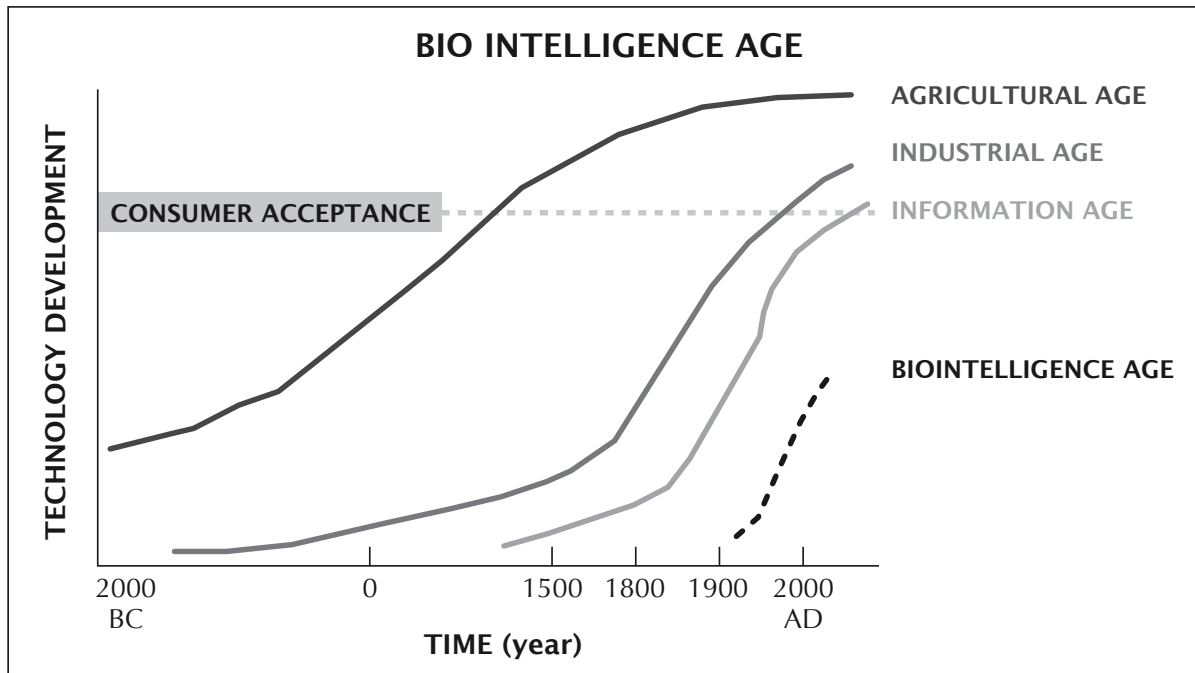
En la actualidad son las tecnologías de punta las hasta ahora descritas. Sin embargo, hay una serie de tecnologías perturbadoras¹⁹ que están cambiando fundamentalmente el modo en que se practicarán la medicina y la cirugía. La perturbación es tan profunda que puede cambiar las bases mismas de cómo se está llevando a cabo la ciencia.²⁰ El método científico es la marca distintiva de una buena ciencia, y se caracteriza por desarrollar una hipótesis, realizar el diseño del estudio, realizar el experimento, analizar los resultados y reportar los hallazgos. Lo que ha estado ocurriendo es que se está realizando un paso intermedio después del diseño del estudio. Consiste en desarrollar un modelo en una computadora y simular el experimento, luego se realiza el experimento real. Ha sido el surgimiento de la computadora lo que ha producido los modelos sofisticados, tales como los motores de automóviles, aviones, entre otros, partiendo del software para el diseño y la manufactura auxiliados por computadora (CAD/CAM) que después es pasado por una serie numerosa de simulaciones utilizando prototipos virtuales, pruebas y evaluaciones para simular el mejor resultado potencial. Sólo entonces se producen y prueban los productos que tienen mayores probabilidades de éxito. Esta metodología –modelado y simulación– ha reducido dramáticamente los costos, el tiempo y los errores al desarrollar un nuevo producto o al probar un nuevo método o procedimiento.

En el ejemplo anterior del holómero, será posible en el futuro adquirir datos decodificados sobre millones de pacientes. Entonces será posible realizar un experimento en un millón de pacientes (holómeros) por cincuenta años en un fin de semana en una supercomputadora. Las simulaciones de gran escala (altas dimensiones) se hacen en otras industrias, como para pronósticos del tiempo, perforación petrolera, construcción y prueba de modelos para autos o aviones nuevos. En breve, el método científico ha comenzado la transformación al agregar el paso adicional de modelar y simular al proceso de descubrimiento científico. El mensaje es claro, modelar y simular está en el corazón de la transformación en la Era de la Información, y la atención a la salud debe comenzar a implementar estas tecnologías dondequiera que sea posible, como por ejemplo, en la educación de cirujanos, planeación preoperatoria, y ensayos quirúrgicos.

Sin embargo, es aparente que esta nueva metodología que define la Era de la Información ya llegó y el consenso es que ya estamos en ella. Por lo tanto, la Era de la Información *no* es el futuro, no es posible estar en el presente y en el futuro al mismo tiempo, así que algo más debe ser el futuro. Un vistazo a lo que podría ser el futuro nos fue descrito por Alvin Toffler en su libro de 1976 “La Tercera Ola”,²¹ en el que describe las tres distintas “eras”: la Era de la Agricultura, la Era Industrial, y la Era de la Información. Parece estar emergiendo una nueva era, tentativamente llamada la Era de la Biointeligencia, hasta que se logre acuñar²² un mejor nombre. En la Figura 2 vemos una curva del surgimiento de las eras, donde se nota que hubo una larga “cola” al principio, cuando ocurre el primer descubrimiento (o investigación de laboratorio). La pendiente se incrementa rápidamente durante la fase revolucionaria, conforme se van introduciendo los descubrimientos y conforme las empresas y negocios comienzan a aprovechar las oportunidades de comercialización de los nuevos productos. Con el tiempo llega un momento en que el/los descubrimiento(s) son aceptados por todo mundo como un lugar común (aceptación del consumidor), y para ese entonces ya no hay nuevos descubrimientos; lo que hay es un avance evolucionario donde se van refinando los productos nuevos a los que se les agregan atributos, pero el descubrimiento básico ya no cambia. La Era de la Información ha llegado a este punto de quiebre de revolución a evolución. En el transcurso de los últimos 20 años, no ha habido descubrimientos nuevos; el teléfono celular y la computadora son fundamentalmente iguales que hace 20-30 años, la única diferencia es que se han hecho más sofisticados o tienen más atributos, como tamaño pequeño, cámaras incorporadas, acceso al Internet, entre otros, pero esos productos realizan exactamente las mismas funciones que antes o combinan las funciones existentes en paquetes más pequeños.

Al discutir los posibles nuevos rumbos para el futuro, resaltan algunos factores. La característica más importante de la Era de la Biointeligencia es su enfoque multidisciplinario. Hasta ahora, la investigación, los productos, entre otros, eran típicamente resultado de trabajos hechos en una de las tres áreas científicas principales: Biología (Ciencias de la Vida), Ciencias Físicas (incluyendo Ingeniería) o Ciencias de la Información. Sin embargo, están ocurriendo nuevos descubrimientos en la intersección de estas disciplinas. ¿Es el Genoma Humano resultado de la Biología o las ciencias de la información? Las dos cosas porque el ADN es un sistema de información vivo. Lo mismo

Figura 2



se puede decir de los biosensores (biología e ingeniería) o robots inteligentes (ingeniería e información). Así, el futuro es el de un enfoque multidisciplinario, ya sea en investigación o incluso en atención a los pacientes (muchas diferentes especialidades están frecuentemente involucradas en la atención de un paciente). Está claro que ahora ya es posible entender nuestro mundo (y a nuestros pacientes) a un nivel totalmente nuevo de complejidad. Empero, no hay una sola persona o médico que pueda entender ni siquiera una pequeña parte del todo. De ahí la necesidad de formar equipos y prácticas interdisciplinarios para poder hacer avances revolucionarios. ¿Exactamente qué harán estas nuevas tecnologías para revolucionar la atención a la salud? He aquí algunos ejemplos.

Fusión de los sistemas vivos con los no vivos (hombre y máquina)

En 1999 Eric Staudacher de la Universidad de Michigan colocó un sensor y un radiotransmisor miniaturizado en unos abejorros. El sensor era sensible al ántrax simulado. Luego el ejército realizó pruebas en las que se les daban los abejorros a los soldados, se liberaba el ántrax simulado y los soldados liberaban a los abejorros que volaban por el área; cuando se encontraba el ántrax, los sensores enviaban la información por radio de regreso a los soldados para que

evitaran esa área. Este sistema combinado de abejorro y sensor realizó algo que ninguno de los dos sistemas podían hacer por sí solos.

El laboratorio Robert Fuller de la Universidad de California en Berkeley está experimentando con cucarachas a las que se les implantan sondas en el cerebro.²³ Las cucarachas entonces se ponen en una banda sin fin para grabar sus ondas cerebrales mientras están corriendo en la banda, esto con el propósito de construir un mejor robot al descifrar cómo se mueve la cucaracha, ya que es la máquina de movimiento más eficiente de la naturaleza. Una tarde los estudiantes se regresaron al laboratorio e hicieron la ingeniería inversa del sistema al desconectar el alambre que registra las señales y conectar dicho alambre a una palanca de mando (joystick) para enviar las señales. Después de poco tiempo pudieron manejar a la cucaracha por el laboratorio con una palanca de mando (joystick). La utilidad de un proyecto así no está clara aún, pero imaginemos que una cámara en miniatura como las de los teléfonos celulares se colocara en la cucaracha también. Hasta sería posible utilizarlas en los desastres (terremoto, tsunami, entre otros.) porque pueden buscar incluso donde los perros no pueden entrar. Actualmente, la milicia está utilizando robots móviles en el campo de batalla para buscar emboscadas en las cuevas, hogares y otros sitios peligrosos.

Robots miniatura

La miniaturización que utiliza sistemas mecánicos microelectrónicos (MEMS por las siglas en inglés de Micro Electronic Machine Systems) ha sido explorada por más de dos décadas. Le ha permitido a los científicos crear sistemas a escala mesoscópica (milimétrica). Los nuevos robots se han hecho sumamente pequeños con computadoras enteras, sistemas de sensores y locomoción incorporados en un robot del tamaño de una moneda. El primer "robot" clínico miniaturizado fue la cápsula videoendoscópica de Paul Swain.²⁴ Se trata de una cápsula del tamaño de una píldora, dentro de la cual hay una cámara en miniatura, una fuente luminosa y un transmisor. El paciente usa una videograbadora en el cinto. Después de deglutirse, la cápsula transmite imágenes (un cuadro cada 30 segundos) conforme va pasivamente recorriendo el tracto gastrointestinal. Se está investigando la siguiente generación para poder controlar la dirección y paso de la cápsula (control robótico) y con el tiempo agregar pequeños efectores en las puntas, como fórceps de biopsia para realizar maniobras terapéuticas.

Cirugía celular (biocirugía)

Más allá de la escala mesoscópica está la escala microscópica y las células individuales. Una nueva tecnología, llamada de láseres femto-segundos (o láseres de pulsos ultra cortos), emite luz láser pulsada a 1×10^{-15} segundos; al dirigirse a la membrana celular es posible crear un orificio (incisión) en la membrana sin causar daño, lo que da acceso al interior de la célula.²⁵ Varios investigadores están comenzando a manipular las estructuras individuales dentro de la célula y un grupo de Dundee, Escocia, está ingresando en el núcleo y manipulando cromosomas. Podría especularse que en el futuro los cirujanos utilizarán estos sistemas para manipular el material genético del individuo o quizá operar directamente en los genes. De ocurrir esto, el resultado de la cirugía será cambiar la mismísima biología de la célula (biocirugía), en lugar de tratar de extirpar órganos o reestructurar tejidos.²⁶ Este tipo de investigación se realiza ahora controlando la posición del láser desde una estación de trabajo. Curiosamente, esto es muy semejante a lo que están haciendo los cirujanos hoy por hoy con la cirugía robótica. La principal diferencia es que la escala en la cirugía celular es mil veces más pequeña. Además, los investigadores están utilizando otras herramientas, como el microscopio de fuerza atómica (AFM por las siglas en inglés de Atomic Force Micro-

scope) para manipular y visualizar a las células. Estos videomotores del AFM no sólo muestran las siluetas de las células, sino las fuerzas reales entre las células, lo que ha dado a los investigadores todo un nuevo modo de "ver" la función de una célula.

Controles robóticos

Muchos de los sistemas descritos arriba son sistemas robóticos que se controlan desde una estación de trabajo semejante a una consola quirúrgica DaVinci. No obstante, conforme se van explorando escalas más complejas, puede haber necesidad de diferentes métodos para controlar estos sistemas. Numerosas universidades trabajan en el control neural directo, la llamada interfaz cerebro-máquina. Se inserta una sonda en el cerebro de un chango. Estas sondas tienen múltiples puntas ramificadas, de tal manera que se puedan sensorizar cientos de neuronas individuales. El experimento se lleva a cabo de la siguiente manera:^{27,28} se inserta una sonda en la corteza motora de un chango, se conecta a una computadora para analizar las señales del EEG y al chango se le enseña a utilizar una palanca de mando (joystick) para mover un punto verde en un monitor de computadora hasta cubrir un punto rojo. Al empalmarse los dos puntos, un brazo robótico alimenta al chango. Se monitoriza el EEG y los investigadores interpretan las señales de movimiento. Una vez interpretadas las señales, el alambre de la sonda cerebral se desconecta de la computadora y se conecta directamente del cerebro al brazo robótico (en forma semejante al experimento de la cucaracha). Se tardan unas seis semanas los changos en percatarse de que no tienen que mover el brazo o la palanca de mandos (joystick) para alimentarse. Hay ahora cinco universidades con changos que se alimentan solos, sencillamente con pensarlo. Pensamientos convertidos en acciones. Las primeras pruebas clínicas con un hombre cuadrapléjico comenzaron en 2005 y después de tres meses, esta persona estaba controlando el cursor en un monitor de video, encendía y apagaba la televisión, e incluso abría y cerraba los dedos de un brazo protésico con simplemente pensarlo.

En la Universidad de Hawai, se están realizando investigaciones para detectar las señales de EEG a través del cráneo sin implantar sondas en el cerebro. Sólo han sido modestos los avances hasta la fecha, pero continuamente se avanza en esto. ¿Será posible que en el futuro un cirujano pueda colocarse un casco en la cabeza para controlar un sistema robótico?

Prótesis inteligentes

Los avances en el desarrollo de dispositivos implantables inteligentes han sido significativos. Los primeros marcapasos cardíacos implantables con los que se comenzó hace 50 años, como un simple generador de pulsos para estimular al corazón en el bloqueo cardíaco completo, ahora se han convertido en un sofisticado sistema de monitorización, de marcapaso, e incluso de desfibrilación automática. Las prótesis de extremidades inferiores para amputaciones por arriba de la rodilla ahora incluyen sensores, actuadores y circuitos de retroalimentación,^{28,30} de manera que los amputados están ahora teniendo un andar casi perfectamente normal. Algunos tienen prótesis especiales para deportes, para alpinismo, entre otros, que de hecho superan el desempeño de una pierna humana. Hay ahora una serie de soldados que sufrieron lesiones graves que condujeron a amputaciones y que han regresado a un servicio de combate completo. Otras prótesis, tales como la retina artificial y la cóclea artificial siguen siendo muy burdas todavía, pero están empezando a restaurar la vista y el oído modestamente. El avance en materiales biocompatibles, la miniaturización de MEMEs, los controles inteligentes de retroalimentación y otras tecnologías están posibilitando la sustitución de cada vez más órganos por prótesis.

Ingeniería de tejidos

Existen numerosos enfoques de reemplazo con tejidos o cultivados sintéticamente al utilizar la ciencia de la ingeniería de tejidos. Esto es el epítome de la medicina multidisciplinaria. Un ejemplo es el Dr. Jay Vacanti del Instituto Tecnológico de Massachussets y el Hospital General de Massachussets en Boston, quien creó un hígado³¹ artificial. Los matemáticos especialistas en computación diseñaron un patrón microvascular con un patrón de ramificación hasta un nivel de 10 micras. Este patrón fue exportado a ingenieros con una máquina de estereolitografía que "imprimía" una estructura vascular en tres dimensiones utilizando un sustrato bioreabsorbible desarrollado por biólogos que se impregnó de factor de crecimiento endotelial vascular, factor de crecimiento derivado de las plaquetas, el factor de angiogénesis y otros factores aportados por los biólogos moleculares. Este andamiaje bioabsorbible se colocó después en un bioreactor con células endoteliales vasculares. Después de unas dos semanas se tenía ahí un sistema vascular vivo. Luego el sistema era perfundido con

sangre y colocado en otro bioreactor con células hepáticas madre y el resultado fue una pequeña muestra de una porción viva de hígado. El siguiente paso será tomarlo para implantarlo en animales. Con órganos más simples, Anthony Atala del Wake Forest Medical Center ha utilizado el andamiaje para cultivar una vejiga artificial. Ha reportado su seguimiento de cinco años en pacientes, todos han tenido implantaciones exitosas, y la mayoría incluso han reestablecido el control neuronal de la función de la vejiga.³²

Ingeniería genética

Hay muchos ejemplos de ingeniería genética, no obstante, hay un aspecto que es particularmente significativo; se trata de la ingeniería genética transgénica, es decir, tomar genes de una especie e insertarlos en otra. Las arañas tejedoras de jardín (*argiope aurantia*) producen la fibra natural más fuerte que se conoce en su hilo. Nexia Technologies de Montreal, Canadá, ha tomado los genes de la araña para la producción de esta proteína y los ha insertado en cabras. Ahora hay rebaños enteros de cabras que están produciendo esta proteína en su leche, a partir de la cual se pueden reconstruir las fibras de esta seda a partir de la proteína.³³ Éste es tan sólo un ejemplo de cómo se toman genes de una especie para ponerlos en otra. Quizá en el futuro, en lugar de ladrillos, cemento y chimeneas, habrá rebaños de animales o campos de plantas que produzcan las cosas que necesitamos, incluyendo las suturas quirúrgicas que se utilizan.

Hibernación y suspensión animada

Brian Barnes, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, hizo un descubrimiento notable: los animales no hibernan porque hace frío; hibernan porque se pueden "apagar a sí mismos".³⁴ De hecho, las ardillas terrestres del ártico se meten en un estado hipometabólico, con signos vitales reducidos radicalmente a un mínimo porcentaje del normal. Esto ocurre por la segregación de una molécula en el hipotálamo. Si el área del hipotálamo se ablaciona y se coloca en el frío a la ardilla, se congela en lugar de hibernar. También si se coloca a una ardilla terrestre normal en el desierto, y se le rodea de alimentos, de todos modos hibernará. Esta molécula mensajera del hipotálamo es desconocida, pero se ha descubierto que en los mitocondrios, donde se produce la energía (ATP), una molécula bloquea este sitio y el oxígeno no puede transferir sus electrones al ATP para crear energía.

Mark Roth, del Centro de Cáncer Fred Hutchinson de Seattle, ha experimentado con ratones y ha podido crear un bloqueo en ellos de tal suerte que se ponen en un estado de suspensión animada por unas seis horas,³⁵ cero respiración, frecuencia cardiaca, tensión arterial, EKG, EEG, temperatura corporal a la temperatura ambiente e incluso cero actividad en Resonancia Magnética Nuclear del cerebro. Después de seis horas se les despierta y se comportan con toda normalidad, recuerdan qué botón oprimir para alimentarse y aprenden nuevos caminos en un laberinto. En tanto que esto es un primer experimento en un esfuerzo de investigación muy largo, señala la posibilidad de utilizar estas moléculas o drogas para anestesiarse. De tener éxito, se podría “dormir” a un paciente para una cirugía sin latido cardíaco, sin sangrar al ser cortado (cirugía incruenta), no podría sentir dolor, no se podría mover, entre otros, y al término de la cirugía se le podría despertar.

Consideraciones morales y éticas

Vivimos en una era de ciencia verdaderamente indignante que rebasa los límites establecidos o razonables, atrevida, provocativa, improbable, extraordinaria.³⁶ Las tecnologías descritas arriba, ciertamente rebasan las expectativas que podrían haber sido previstas apenas hace 10 años, mucho menos hace 50 ó 100 años. No obstante, existe un tema mucho más importante con respecto a estos descubrimientos. Plantean aspectos y preguntas morales y éticas que van mucho más allá de lo prometido por cualquier tecnología del pasado. Los descubrimientos del pasado tuvieron impactos sobre individuos o grupos de individuos, estos descubrimientos, sin embargo, tienen un impacto sobre los fundamentos mismos de la civilización como la conocemos. La razón es que la tecnología está rebasando por mucho nuestra capacidad de adaptación. La aceleración de la tecnología está creciendo exponencialmente, y los negocios la siguen muy de cerca para explotarla. Sin embargo, nuestros sistemas sociales no pueden responder tan rápidamente y los sistemas de atención a la salud tienen una respuesta aún más lenta.³⁷ Debido a las consecuencias de un efecto indeseable de una nueva tecnología, los médicos deben ser muy estrictos al evaluar la tecnología y deben pensarlo muy bien antes de adherirse a “cada nueva moda que se presente”. Una deliberación y evaluación así, en frío, requiere de un tiempo de preparación muy largo, así que es imperativo ver las consideraciones éticas y morales al principio en el desarrollo de una nueva

tecnología. Los médicos deben participar en estas decisiones o dejar que la implementación y resultados de la innovación sean determinados por personas sin escrúpulos con ambiciones políticas o egoístas.

La tecnología es neutral, no es ni buena ni mala. Es nuestra responsabilidad dotarla de una inspiración, de una vida moral y ética, y luego seguir dichos dictados de la moral y la ética con empatía y compasión por cada paciente. Los siguientes son algunos ejemplos de tecnologías que representan desafíos éticos extraordinarios.

Clonación humana

En abril de 2002, se hizo público un anuncio de que se había impregnado al primer ser humano con un clon, y 9 meses después nació el primer clon humano. La respuesta inmediata de todos los gobiernos fue prohibir la clonación humana. Sin embargo, en la actualidad hay por lo menos tres países que la apoyan. El debate continúa sobre este tema (y sobre las células madre), en tanto que la ciencia se queda entre mensajes encontrados, reducción en los financiamientos y la amenaza de una sobrevigilancia sofocante. ¿Quién debe decidir a qué (o a quién) clonar? ¿Será correcto desarrollar clones sin cerebro para tener partes de repuesto? ¿Realmente necesitamos clonar más gente, qué sucederá con la población humana? Actualmente se padece para alimentar a tanta gente.

Ingeniería genética

El primer niño genéticamente diseñado nació en 2003. También existe una serie de niños nacidos con la meta adicional de cosechar sus células madres para salvar a un hermano (“bebés salvadores”). Pero aún más radical es la ingeniería transgénica (semejante a lo de la araña y la cabra). Los seres humanos tienen cuatro rodopsinas para la visión, pero usan sólo dos. Las víboras tienen una de las mismas rodopsinas que los seres humanos no usan y que le da a la serpiente la capacidad para buscar a su presa en el infrarrojo,³⁸ y el chuparrosa o colibrí puede ver en ultravioleta.³⁹ ¿Deberíamos diseñar genéticamente a nuestros hijos para darles esas habilidades y para que puedan ver en la oscuridad? ¿Deben tener habilidades que otros no tienen y darles una enorme ventaja? ¿Y quién decidirá qué niños pueden ser “mejorados”? ¿Nos encontramos ante el umbral de diseñar a nuestros hijos al grado en que habrá toda una clase de individuos mejorados?

Longevidad

Hay por lo menos tres sepas de ratones que prolongan sus tiempos de vida por dos o tres veces usando la apoptosis, telomerasa, manipulación nutricional, entre otros.⁴⁰ ¿Deberán estos mismos mecanismos ser exitosos en los humanos, la expectativa de vida humana normal se incrementaría a 150 ó 200 años. ¿Cuáles son las profundas consecuencias de vivir tanto tiempo? ¿Se jubila una persona a la edad de 55-65 años? ¿Tener carreras múltiples, entre otros? Si la gente no se muere, la población se incrementará aún más rápidamente.

Computadoras o robots inteligentes

Noel Sharkey, profesor de ingeniería de la Universidad de Sheffield (Sheffield, Reino Unido) ha programado pequeños robots con “programación basada en reglas” que les permite aprender. Los colocó en una sala con chatarra desparramada y cerró la puerta. Los robots estuvieron hurgándola durante unos seis meses. Un día, se abre la puerta y uno de los robots se escapó: salió por la puerta, bajó las escaleras, salió por otra puerta y fue capturado al cruzar rápidamente el estacionamiento.⁴¹ Este robot jamás había visto una escalera, una puerta o el exterior, pero pudo navegar para salirse del edificio. ¿Representa esto a un nivel bajo de inteligencia, será quizá tan listo como una hormiga? ¿Estaremos finalmente ante el umbral de desarrollar un nivel útil de inteligencia para las computadoras y los robots? Los pioneros en robótica e inteligencia artificial, tales como Hans Moravec⁴² o Ray Kurzweil,⁴³ señalan dónde se encuentran las computadoras con relación al cerebro humano en términos de poder de computación. Con base en el número de neuronas y sinapsis por neurona, se estima aproximadamente que el cerebro humano computa a razón de 4.0×10^{19} computaciones por segundo (cps). La computadora más rápida hasta la fecha computa a aproximadamente 3.5×10^{16} cps, aproximadamente mil veces más despacio que el cerebro humano. No obstante, parece que la Ley de Moore (que se traduce más o menos en que el poder computacional se duplica aproximadamente cada 18 meses) nos indica que: (¡Hagamos los cálculos matemáticos!) en aproximadamente 10 duplicaciones, es decir en 15 a 20 años, las computadoras estarán computando tan rápidamente como el cerebro humano. ¿Serán inteligentes las computadoras? Y de ser así ¿deberán concedérseles “derechos”? ¿Podremos reconocer su inteligencia? ¿Recordarán que nosotros las hicimos? ¿Les importará siquiera? Si se desenchufa a una com-

putadora, ¿será eso el asesinato de un ser inteligente? Ésta y muchas otras preguntas aparentemente triviales están ahora asumiendo serias connotaciones al ir avanzando vertiginosamente la tecnología.

Sustitución de partes corporales

Con el rápido avance de la ingeniería tisular, los órganos sintéticos, las prótesis inteligentes, la regeneración y otras tecnologías, pronto será posible sustituir casi cualquier parte del cuerpo humano (excepto el cerebro). Con las prótesis especializándose cada vez más y haciéndose incluso muy superiores a la parte corporal de la persona misma ¿será ético quitarle a una persona una pierna u ojo “normal” para sustituirla con uno sintético que sea mucho mejor que el órgano con el que nació la persona? Si una persona sustituye el 95% de su cuerpo con partes artificiales, ¿sigue siendo humana? ¿Qué es exactamente lo que constituye lo “humano”? ¿la sangre y la carne con la que nace la persona o hay algo más?

Conclusiones

La tecnología avanza rápidamente, incluso al ir implementando, por ejemplo en un procedimiento nuevo como la cirugía laparoscópica, las nuevas tecnologías que la reemplazarán (como la cirugía robótica) la vienen siguiendo muy de cerca. Las nuevas ciencias están produciendo notables oportunidades nuevas, especialmente con las tecnologías no quirúrgicas emergentes, tales como los órganos artificiales, la regeneración, las prótesis, la suspensión animada y otras. Algunas de estas tecnologías incrementarán la habilidad del cirujano para realizar la cirugía, otras eliminarán la necesidad de cirugía. Si hay alguna lección encerrada en esto, es que a la velocidad de cambio actual, cada cirujano verá no una, sino varias revoluciones durante su carrera. La práctica de la cirugía está cambiando más rápidamente ahora que en cualquier tiempo pasado.

Las tecnologías descritas arriba y la especulación sobre sus posibles consecuencias éticas y morales deberán despertarnos a una conciencia nueva de la responsabilidad que nosotros, los cirujanos, deberemos aceptar. Ignorar lo posible, hacer caso omiso de ello, sin importar lo descabellado que nos pueda parecer en este momento, pone en peligro a las generaciones futuras. En tanto que ni los escenarios como los dibujamos, ni los aspectos éticos o morales como los postulamos vendrán a ser exactamente como los hemos descrito, queda claro que las ciencias duras detrás de

estos temas continuarán avanzando inexorablemente a un ritmo cada vez más acelerado.

Lo que hoy por hoy es fantasía pura, se convertirá en los hechos indiscutibles del mañana. Lo más importante es que los aspectos éticos y morales son tan profundos que se necesitarán décadas enteras para encontrar soluciones equitativas que sean tanto filosóficamente puras como pragmáticamente realizables. Y quién mejor para participar que aquéllos que han hecho el sagrado juramento –el Juramento de Hipócrates– y han aceptado ser los custodios de sus pacientes y estudiantes. Se hace obligatorio inculcar en nuestros estudiantes un sentido de urgencia, un sentido de magnitud y aceptación de la obligación no sólo para con nuestros pacientes y la profesión, sino para con toda la humanidad. Sobre sus hombros, literalmente, descansa el destino de la especie humana. Ignorar esta carga es abdicar a favor de aquéllos (los políticos, abogados y otros) que confunden el sacrificio del idealismo con su propia realidad de intereses egoístas. Parafraseando a Francis Fukuyama al describir “Nuestro Futuro Post Humano”,⁴⁴ estamos ahora acercándonos a la pregunta última: “...Hoy camina sobre nuestro planeta una especie tan poderosa, que puede controlar su propia evolución, a su antojo y en su propio tiempo... *homo sapiens*. ¿En qué nueva especie escogeremos convertirnos?”.

Referencias bibliográficas:

1. Negroponte, Nicholas. Being Digital, MIT Press, Cambridge, 1995 pp 11-13.
2. Satava RM. Surgery 2001: A Technologic Framework for the Future. Surg Endosc 7: 111-13, 1993.
3. Hanzlick R. National autopsy data dropped from the National Center for Health Statistics Database. JAMA. 1998 Sep 9;280(10):886.
4. Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Boesch C, Ozdoba C, Schroth G, Ith M, Sonnenschein M, Doernhoefer T, Scheurer E, Plattner T, Dirnhofer R Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI)-a feasibility study. J Forensic Sci. 2003 Mar;48(2):386-403.
5. Levy AD, Abbott RM, Mallak CT, Getz JM, Harcke HT, Champion HR, Pearse LA. Virtual autopsy: preliminary experience in high-velocity gunshot wound victims. Radiology. 2006 Aug;240(2):522-8.
6. Satava RM. Innovative Technologies: The Information Age and the BioIntelligence Age (ed). Surg Endosc 14:417-18, 2000.
7. Marescaux J, Smith MK, Forbes L, Jamali F, Malassagne B, and Leroy J. Telerobotic laparoscopic cholecystectomy: Initial experience with 25 patients. Ann Surg . 2001 Jul;234(1):8-9.
8. Anvari M, McKinley: Routine use of telerobotic remote surgery. Proc 9 th World Congress of Endoscopic Surgery 2004. 5:46.
9. Vaezy S, Martin R, Keilman G, Kaczkowski P, Chi E, Yazaji E, Caps M, Poliachik C, Carter S, Sharar S, Comejo C, Crum L.

- Control of Splenic Bleeding by using high intensity ultrasound. J Trauma 1999 47:521-5.
10. Velmahos GC, Demetriades D, Ghilardi M, Rhee P, Petrone P, Chan LS. Life Support for Trauma and Transport (LSTAT): A mobile ICU for safe in-hospital transport of critically injured patients. J Am Coll Surg(2004) 199:62-68.
11. Satava RM. Virtual Reality Surgical Simulator: The First Steps Surg Endosc 7: 203-05, 1993.
12. Datta V, Mackay S, Mandalia M, Darzi A. The use of electromagnetic motion tracking analysis to objectively measure open surgical skill in the laboratory-based model. J Am Coll Surg. 2001 Nov;193(5):479-85.
13. Seymour Seymour NE, , Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Andersen D, Satava RM. Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance: Results of a Randomized, Double-blinded Study. Ann Surg 236: 458-64, 2002.
14. Rattner D. Introduction to NOTES White Paper. Surg Endosc. 2006 Feb;20(2):185.
15. Sandberg WS, Ganous TJ, Steiner C. Setting a research agenda for perioperative systems design. Semin Laparosc Surg. 2003 Jun;10(2):57-70. Review.
16. LaPorte E. Intelligent Operating Room Lights (personal communication)
17. Treat M. Intelligent Robot scrubs in. Obtenido de http://www.cumc.columbia.edu/news/invivo/Vol3_iss01_jan26_04/surgery.html.
18. Wang, Yulun Mobile Robots. Obtenido en julio, 2006, de <http://intouchhealth.com/>
19. Christensen C. Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Firms to Fail. Harvard Business: Boston. 1997.
20. Satava R The scientific method is dead--long live the (new) scientific method. Surg Innov. 2005 Jun;12(2):173-6.
21. Toffler, A Third Wave William Morrow & Co, New York. 1980.
22. Satava RM., Innovative technologies The Information Age and the BioIntelligence Age, Surg Endosc 2000: 14, pp. 417-418.
23. Dickinson, M.H., C.T. Farley, R.J. Full, M.A.R. Koehl, R. Kram, and S. Lehman. 2000. How animals move: An integrative view. Science 288:100-106.
24. Iddan G, Meron G, Glukhovskiy A, Swain P. Wireless capsule endoscopy. Nature. 2000 May 25;405(6785):417.
25. Tirlapur UK, König K. Targeted transfection by femtosecond laser Nature 2002; 418:290-1.
26. Satava RM, Wolff R. Disruptive visions: BioSurgery. Surg Endosc 2003; 17: 1833-36.
27. Nicoletis MA, Dimitrov D, Carmena JM, Crist R, Lehew G, Kralik JD, Wise SP. Chronic, multisite, multielectrode recordings in macaque monkeys. Proc Natl Acad Sci 2003;100(19): 11041-6.
28. Donoghue JP, Nurmikko A, Fries G, Black M. , Development of neuromotor prostheses for humans. Suppl Clin Neurophysiol. 2004;57:592-606.
29. Rheo Bionic knee by Ossur, Reyknavik, Iceland. Obtenido en mayo, 2006, de <http://www.ossur.com/>
30. C-leg knee - Otto Bock, Minneapolis, MN. Obtenido en mayo, 2006, de <http://www.ottobock.com/>
31. Grikscheit TC, Ogilvie JB, Ochoa ER, Alsberg E, Mooney D, Vacanti JP. Tissue-engineered colon exhibits function in vivo. Surgery 2002 132:200-04
32. Koh CJ, Atala A. Tissue engineering for urinary incontinence applications. Minerva Ginecol. 2004 Aug;56(4):371-8.
33. Nexia Technologies. Obtenido de <http://www.nexiabiotech.com>
34. Hut RA, Barnes BM, Daan S. Body temperature patterns before, during, and after semi-natural hibernation in the European ground squirrel. J Comp Physiol [B]. 2002 Jan;172(1):47-58.
35. Roth MB, Nystul T Buying time in suspended animation. Sci Am. 2005 Jun;292(6):48-55.

36. Oxford English Dictionary; Oxford: Oxford University Press. Obtenido en 2006, de <http://www.oed.com>
37. Satava R, Surgeon responsibility in the era of change. *JSLs*. 2003 Oct-Dec;7(4):293-4.
38. Gorbunov V, Fuchigami N, Stone M, Grace M, Tsukruk VV. Biological thermal detection: micromechanical and microthermal properties of biological infrared receptors. *Biomacromolecules*. 2002 Jan-Feb;3(1):106-15.
39. Goldsmith TH. Hummingbirds see near ultraviolet light. *Science*. 1980 Feb 15;207(4432):786-8.
40. Saito K, Yoshioka H, Cutler RG. A spin trap, N-tert-butyl-alpha-phenylnitron extends the life span of mice. *Biosci Biotechnol Biochem*. 62(4):792-4. 1998
41. Sharkey NE: The new wave in robot learning. *Robotics and Autonomous Systems* 22 (3-4): 179-185 (1997).
42. Morevac H *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind* New York, Oxford University Press, 2001.
43. Kurzweil R. *The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence* London: Texere Publishing Ltd, 2001.
44. Fukuyama F. *Our Post Human Future*. Farrar Straus & Giroux: NYC, April 2002.

Correspondencia:

Dr. Richard M. Satava, MD FACS

Email: rsatava@u.washington.edu