



La convergencia de la imagen intravascular con el procesamiento y el modelado computacionales

The coming convergence of intravascular imaging with computational processing and modeling

Max L. Olender^{a,b,*} y Elazer R. Edelman^{a,c}

^a Institute for Medical Engineering and Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos

^b Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos

^c Cardiovascular Division, Brigham and Women's Hospital, Boston, Massachusetts, Estados Unidos

Hace tiempo que medicina y tecnología viajan en el mismo vagón. Los médicos pulverizan los límites haciendo un uso experto de las herramientas que tienen a su disposición. Por su parte, científicos e ingenieros responden a las demandas y necesidades de estos desarrollando herramientas de última generación y ampliando el espacio de trabajo y exploración de los médicos. Esta rompedora asociación es especialmente prevalente en el campo de la cardiología intervencionista, que ha acogido, con grandes dosis de entusiasmo y efectividad, avances en tecnologías percutáneas y de imagen que han revolucionado la medicina cardiovascular. Siguiendo con esta tradición, diversos avances en procesamiento y modelado computacionales prometen mejorar la utilidad y eficacia de las imágenes vasculares con algunas herramientas que ya se emplean en el ámbito clínico. Por ejemplo, una herramienta que emplea modelos computacionales a partir de una angiografía computarizada para valorar la reserva fraccional de flujo ha mejorado el proceso de toma de decisiones clínicas y reducido los índices de intervenciones invasivas innecesarias¹. Nuevas herramientas unificarán los ámbitos físico y virtual de la medicina gracias al nexo que nos brindan las imágenes y nos ofrecerán herramientas sencillas para el etiquetado y cuantificación de imágenes individuales y avanzadas para la simulación y perfilado completo de las lesiones. El futuro de esta alianza entre medicina y tecnología deberá retroalimentarse continuamente y prosperará gracias a las entusiastas e importantes contribuciones que hagan cardiólogos intervencionistas bien informados.

¿QUÉ SON EL PROCESAMIENTO Y MODELADO COMPUTACIONALES?

El procesamiento computacional consiste en la aplicación de algoritmos y software para la realización de intervenciones específicas y codificadas. El procesamiento computacional se puede aplicar a las imágenes intravasculares para realzar, caracterizar o detectar y cuantificar las características que nos muestran las imágenes. Una aplicación de este procesamiento es extraer las características fisiológicas que se usan para generar modelos computacionales de la región de los vasos captada en imágenes. El modelado computacional consiste en la creación y uso de representaciones virtuales

de sistemas físicos. Estas representaciones se pueden programar a partir de un conjunto de reglas que prescriben cómo deben comportarse y responder en diferentes condiciones y, de esta forma, se pueden emplear modelos para simular el comportamiento del sistema físico ante diferentes escenarios hipotéticos.

NECESIDADES NO CUBIERTAS EN CARDIOLOGÍA INTERVENCIONISTA

A medida que vamos avanzando hacia una atención médica más precisa y personalizada, la convergencia de imágenes intravasculares con el procesamiento y modelado computacionales está llamada a ser la clave del empoderamiento del colectivo de cardiólogos intervencionistas. El papel y la necesidad de esta convergencia (figura 1), parte de una visión más amplia de la cardiología computacional², adquieren un valor añadido si se tienen en cuenta los retos a los que se enfrenta, en la actualidad, la práctica de la cardiología intervencionista.

Valoraciones estándar con una menor carga de trabajo intervencionista

Entre los papeles más relevantes y urgentes del procesamiento computacional está integrar y aumentar, que no desplazar, las tareas que desempeñan los cardiólogos intervencionistas. Los métodos computacionales pueden acabar con la variabilidad inter e intra-observador, monotonía y tiempo implícitos en la enorme tarea que supone la medición manual de las imágenes intravasculares. Este análisis se podría realizar en un segundo plano y de forma continua sin las restricciones asociadas a los extenuantes horarios de los médicos. Estas tecnologías de procesamiento también ayudan a médicos con poca formación, experiencia o dominio sobre la materia. Médicos que, de otro modo, no podrían identificar características importantes en las imágenes intravasculares. El modelado computacional ofrece, además, importantes métricas cuantitativas sobre el estado vascular que no se pueden medir directamente como, por ejemplo, mediciones del estrés dentro y a lo largo de las paredes de los vasos.

* Autor para correspondencia: 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, Estados Unidos.
Correo electrónico: molender@mit.edu (M. Olender).

Online: 15-03-2021.

Full English text available from: www.recintervcardiol.org/en.

2604-7306 / © 2021 Sociedad Española de Cardiología. Publicado por Permanyer Publications. Este es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND 4.0.

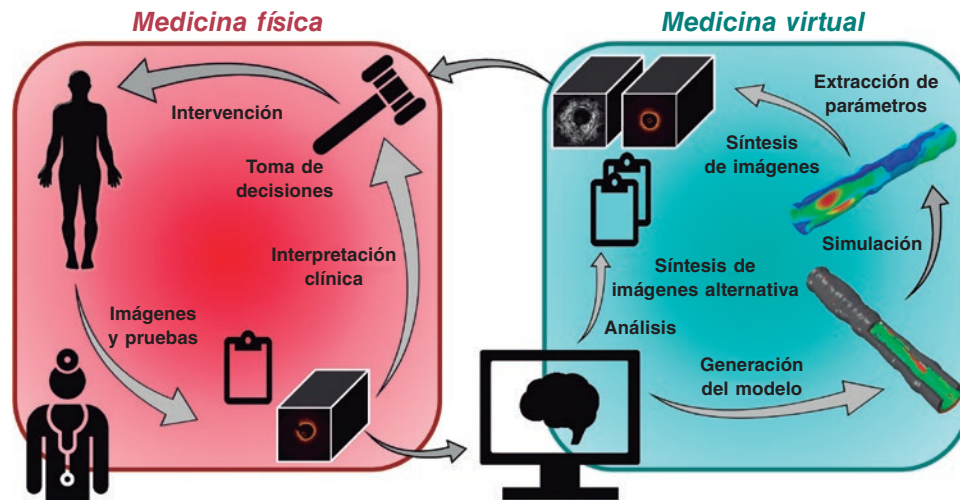


Figura 1. Nuestra visión de futuro de la medicina cardiovascular aún la medicina física y virtual como parte de una única entidad. Los médicos recopilan datos, imágenes y resultados de pruebas de un paciente. Tanto la información anatómica como morfológica se extraerá, de forma automática, mediante rutinas de procesamiento algorítmico que se condensarán en las métricas cuantitativas descritas y emplearán para generar modelos computacionales específicos de cada paciente. Se realizarán diferentes pruebas simuladas e intervenciones en pacientes virtuales. Los resultados tanto de los análisis como de las simulaciones volverán a transformarse en datos clínicos que permitan una integración y valoración por parte del equipo cardiológico multidisciplinario; los resultados servirán para dotar de información al proceso de toma de decisiones y guiar la intervención de los pacientes.

Elaboración de perfiles y estratificación de los pacientes

La premisa principal de la medicina de precisión es que las poblaciones de pacientes se pueden segmentar en ajustadas clasificaciones en base a las diferentes respuestas que tengan a las intervenciones realizadas. La comunidad cardiológica ha propuesto amplias clasificaciones para dividir las placas ateroscleróticas en función del tipo de tejido predominante y al supuesto grado de avance de la enfermedad³. A pesar de su simplicidad, esta clasificación ha tenido muy pocas actualizaciones importantes durante las últimas décadas, aun a pesar de que las imágenes intravasculares proporcionan información cada vez más detallada sobre la geometría y morfología de las lesiones y sobre la evolución que ha tenido el tratamiento de la enfermedad. El procesamiento y modelado computacionales permiten elaborar mejores perfiles de los pacientes en base a la presentación clínica de estos, estado de la enfermedad, fenotipo detallado de la lesión y hasta de su condición mecánica. Mediante la computación de series de medidas cuantitativas para describir paciente y lesión, la posibilidad de elaborar un perfil más robusto de cada paciente se hace más palpable. Este perfilado granular permitiría, además, estratificar para una mejor valoración de aquellos pacientes que más se beneficiarían de estas o aquellas intervenciones para, así, poder guiar la toma de decisiones terapéuticas⁴.

Predicción y valoración del riesgo como respaldo del proceso de toma de decisiones clínicas

Además de mejorar tanto la elaboración de perfiles como la estratificación, el modelado computacional permite realizar verdaderas valoraciones personalizadas del riesgo y predecir el avance de la enfermedad bajo diferentes regímenes de tratamiento. Como, en la actualidad, buena parte de la interpretación que se hace de las imágenes intravasculares es cualitativa, la toma de decisiones durante el manejo de los pacientes se convierte en una mezcla de arte y ciencia empírica que depende de las experiencias personales y sesgos de cada cardiólogo, de su formación y de las prácticas que lleve a cabo cada centro. Más allá de la experiencia personal de médico y centro, el procesamiento y modelado computacionales

ofrecen una cuantificación estandarizada y repetible para dotar de información al proceso de toma de decisiones. Por ejemplo, simulaciones de modelos detallados o específicos de pacientes y lesiones o «gemelos digitales»⁵ permitirían probar diferentes intervenciones virtuales o parámetros de estas antes de optar por la estrategia óptima a efectos de minimizar el riesgo. Por otro lado, los modelos sobre el avance de la enfermedad y el crecimiento de la placa nos pueden ayudar a predecir qué lesiones en ese momento no significativas pueden tener peor pronóstico y necesitar, por tanto, acciones profilácticas y cuáles tienen más posibilidades de mantenerse benignas e intrascendentes con el paso del tiempo.

HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS EN FASE DE DESARROLLO

Para satisfacer las necesidades del procesamiento y modelado computacionales en cardiología intervencionista, se están desarrollando diferentes tecnologías que aprovechan la riqueza de datos que proporcionan las imágenes intravasculares. La detección y medición de las características geométricas ya está disponible en algunos casos y es probable que se amplíe a más. La delineación automática del lumen y la lámina elástica externa ya se ha incorporado a algunos sistemas ecográficos intravasculares y los avances en procesamiento computacional han ofrecido, recientemente, resultados prometedores para su identificación, así como también de la lámina elástica interna, en las imágenes mediante tomografía de coherencia óptica. Gracias a la detección automática de los bordes internos y externos de los vasos, las mediciones automáticas de *pullbacks* como el área luminal, la carga de placa, la excentricidad y el índice de remodelado reducirán la necesidad de identificaciones manuales y anotaciones de los *frames* más críticos posibilitando una mejor visualización de los vasos enfermos. Información que, también, podrá utilizarse, por ejemplo, para un correcto dimensionamiento de balones y *stents*.

Los avances en el procesamiento de imágenes también ofrecen una mayor disponibilidad de información sobre la morfología de las lesiones. Aunque, por lo general, los expertos son duchos a la hora de determinar la composición y distribución de la placa a partir de imágenes procedentes de cortes transversales, este es un proceso

lento que requiere de una gran experiencia. Disponer de una histología virtual automatizada ayudará a mejorar la caracterización, perfilado y estratificación de los fenotipos de las diferentes lesiones a estudio. Las nuevas técnicas de imágenes para caracterizar la dureza de tejidos enfermos también prometen ofrecer más información sobre el perfil mecánico de una lesión. Toda esta información sobre la distribución y propiedades de la placa ayudará a los cardiólogos a planificar y guiar las intervenciones [aportando, por ejemplo, datos sobre cómo preparar o modificar la lesión antes de proceder a la implantación de un *stent*].

El modelado computacional es una pieza clave de la investigación y desarrollo tecnológicos que se llevan a cabo en la actualidad. La capacidad de simular el avance de la enfermedad y las intervenciones es un reto estimulante que ha llamado la atención de los equipos cardiológicos multidisciplinares. Entre estos esfuerzos, importantes proyectos colaborativos europeos han intentado desarrollar y refinar modelos predictivos avanzados de los procesos de la placa aterosclerótica y la angioplastia integrando factores de riesgo de los pacientes, resultados del panel metabólico y datos de imágenes⁶. No obstante, uno de los obstáculos sigue siendo una validación longitudinal robusta.

El procesamiento computacional ofrece otra función poco explorada para la sintetización y mejora de imágenes. Como las imágenes intravasculares constituyen la piedra angular de la cardiología intervencionista, estas capacidades generadoras podrían usarse, con una alta efectividad, para mejorar la calidad y eficacia de las imágenes diagnósticas, proporcionar información generada a partir de modelos computacionales y fomentar la formación en lectura e interpretación de imágenes.

Son varias las tecnologías que se están desarrollando en la actualidad y que, quizá, requieran cambios en la práctica clínica en un futuro. Por ejemplo, algunos métodos requieren múltiples *pullbacks* de imágenes o mediciones simultáneas de la presión y adquisición de imágenes emparejadas. Los cambios estarán condicionados por los correspondientes avances y la adopción de nuevo hardware, una relación coste-beneficios demostrada para los pacientes y la acogida que tenga entre la comunidad de cardiólogos intervencionistas.

EL PAPEL CLAVE DE LOS CARDIÓLOGOS INTERVENCIONISTAS

Los cardiólogos intervencionistas tienen un papel esencial no solo en la futura adopción de tecnologías de procesamiento y modelado computacionales, sino también en el presente, definiendo y materializando ese futuro. Aquellos con experiencia en el manejo y tratamiento de pacientes tendrán un papel primordial dirigiendo, desarrollando y encauzando estas nuevas tecnologías. Sus profundos conocimientos sobre las demandas y limitaciones prácticas de la atención sanitaria son claves para científicos e ingenieros por igual. En la actualidad, hay también una necesidad perentoria de datos con los que formar y validar nuevos métodos y modelos. Aquí también, la implicación, experiencia y aportaciones de cardiólogos colaboradores se antojan esenciales.

La cada vez mayor integración de tecnologías más complejas también está obligando a los cardiólogos a tener que cultivar su vertiente más tecnológica. Aunque las ciencias médica y sanitaria deben seguir siendo la prioridad del proceso formativo para los cardiólogos intervencionistas, una formación más integral parece esencial para poder valorar, desde un punto de vista crítico, las innovaciones y tomar decisiones informadas sobre la aplicabilidad

y fiabilidad de nuevas tecnologías a medida que estas vayan llegando al ámbito médico. Los médicos deberán comprender los supuestos, incertidumbres y condiciones en base a los cuales estas herramientas deben aplicarse, de una forma beneficiosa, durante el manejo de sus pacientes. Los cardiólogos intervencionistas y otras profesiones médicas ya están bien equipados para abordar muchas de estas tareas. Si miramos más allá de la novedad y las capacidades implícitas de estos métodos, deberían aplicarse, por igual, conceptos básicos y familiares que ya se emplean en otras pruebas diagnósticas, como la sensibilidad y la especificidad, para analizar nuevas herramientas avanzadas de *software*.

A medida que el procesamiento y modelado computacionales converjan con las imágenes intravasculares durante los próximos años, los cardiólogos intervencionistas dispondrán de las herramientas necesarias para poder prestar una atención médica más precisa y personalizada. Los expertos en este campo tendrán un papel activo en el desarrollo, valoración y adopción de nuevas tecnologías y deberán disponer de los conocimientos y habilidades necesarios para sacarles el mayor jugo posible a estas tecnologías durante el manejo de sus pacientes.

FINANCIACIÓN

Este trabajo está subvencionado por los *U.S. National Institutes of Health* (Bethesda, MD, Estados Unidos; subvención n° 5R01GM049039-24) y por el *Massachusetts Institute of Technology* (Cambridge, MA, Estados Unidos; beca de investigación en ingeniería de MathWorks).

CONFLICTO DE INTERESES

M. Olender y E.R. Edelman ostentan las patentes pendientes *Arterial Wall Characterization in Optical Coherence Tomography Imaging* (16/415,430) y *Systems and Methods for Utilizing Synthetic Medical Images Generated Using a Neural Network* (62/962,641). M. Olender, además, asegura haber recibido subvenciones de MathWorks durante la realización del estudio; por su parte, E.R. Edelman asegura haber recibido subvenciones de los *U.S. National Institutes of Health* durante la realización del estudio, así como subvenciones de Abiomed, Edwards LifeSciences, Boston Scientific, Medtronic, Autus Medical, Biodevek y Panther Therapeutics y honorarios por su trabajo para Abbvie fuera del marco del trabajo enviado para su publicación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Douglas PS, Pontone G, Hlatky MA, et al. Clinical outcomes of fractional flow reserve by computed tomographic angiography-guided diagnostic strategies vs. usual care in patients with suspected coronary artery disease: The prospective longitudinal trial of FFRCT: Outcome and resource impacts stud. *Eur Heart J*. 2015;36:3359-3367.
2. Athanasiou LS, Nezami FR, Edelman ER. Computational Cardiology. *IEEE J Biomed Health Inform*. 2019;23:4-11.
3. Stary HC, Chandler AB, Dinsmore RE, et al. A Definition of Advanced Types of Atherosclerotic Lesions and a Histological Classification of Atherosclerosis. *Circulation*. 1995;92:1355-1374.
4. Gray RA, Pathmanathan P. Patient-Specific Cardiovascular Computational Modeling: Diversity of Personalization and Challenges. *J Cardiovasc Transl Res*. 2018;11:80-88.
5. Corral-Acero J, Margara F, Marciniak M, et al. The 'Digital Twin' to enable the vision of precision cardiology. *Eur Heart J*. 2020;41:4556-4564.
6. Sakellarios AI, Pelosi G, Fotiadis DI, et al. Predictive Models of Coronary Artery Disease Based on Computational Modeling: The SMARTool System. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2019;2019:7002-7005.