

# Modelado 3D del sistema vascular

Jean François Uhl,<sup>1</sup> Guillermo Prat,<sup>2</sup> David Costi,<sup>3</sup> José Alberto Ovelar,<sup>4</sup> Franco Scarpelli,<sup>5</sup> Camilo Ruiz,<sup>5</sup> Bárbara Lorea<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Investigador URDIA-Universidad Paris-Sorbonne.

<sup>2</sup> Director Laboratorio Investigaciones Morfológicas Aplicadas. Fac. Ciencias Médicas. UNLP.

<sup>3</sup> Codirector Laboratorio Investigaciones Morfológicas Aplicadas. Fac. Ciencias Médicas. UNLP.

<sup>4</sup> Profesor adjunto cátedra Cirugía B. UNLP. Jefe Servicio de Cirugía General Hospital Universitario Integrado, H. Cestino, Ensenada.

<sup>5</sup> Ayudante Alumno del Laboratorio de Investigaciones Morfológicas Aplicadas. Fac. Ciencias Médicas. UNLP.

**Flebología 2018;44:17-27**

## Resumen

El modelado 3D del sistema vascular puede lograrse de diferentes maneras: En la localización venosa, el modelado morfológico por venografía TC multicorte (VTMC) se usa para visualizar el sistema venoso: esta herramienta de modelado morfológico investiga con precisión la morfología 3D de la red venosa de nuestros pacientes con enfermedades venosas crónicas. También es una buena herramienta educativa para los estudiantes que aprenden anatomía venosa, la más compleja del cuerpo humano. Otra clase de modelado (el modelado matemático) es utilizado para simular las funciones venosas, y virtualmente prueba la eficacia de cualquier tratamiento propuesto. Para visualizar el sistema arterial, el objetivo del modelado 3D es evaluar y cuantificar con precisión la morfología arterial. El uso de la realidad aumentada ante un procedimiento endovascular permite simular el pretratamiento, ayudando en la planificación preoperatoria, así como en el entrenamiento quirúrgico. En el campo especial de la cirugía hepática están disponibles varios softwares de modelado 3D para simulaciones por computadora, entrenamiento y realidad aumentada.

**Palabras claves.** Reconstrucción 3D, modelado vascular, TC Multicorte, AngioTC, representación de volumen (TVR), modelado vectorial, realidad virtual, simulación, entrenamiento quirúrgico, realidad aumentada, anatomía educativa.

## 3D modeling of the vascular system

### Summary

The 3D modeling of the vascular system could be achieved in different ways: in the venous location, the morphological modeling by MSCT venography is used to image the venous system: this morphological modeling tool accurately investigates the 3D morphology of the venous network of our patients with chronic venous disease. It is also a fine educational tool for students who learn venous anatomy, the most complex of the human body. Another kind of modeling (mathematical modeling) is used to simulate the venous functions, and virtually tests the efficacy of any proposed treatments. To image the arterial system, the aim of 3D modeling is to precisely assess and quantify the arterial morphology. The use of augmented reality before an endovascular procedure allows pre-treatment simulation, assisting in pre-operative planning, as well as, surgical training. In the special field of liver surgery, several 3D modeling software products are available for

**Correspondencia:** José Alberto Ovelar  
Correo electrónico: dr.ovelar@gmail.com

*computer simulations and training purposes and augmented reality.*

**Key words.** *3D reconstruction, vascular modeling, Multislice CT, Angio-CT, volume rendering (VRT), vectorial modeling, virtual reality, simulation, surgical training, augmented reality, educational anatomy.*

## ¿Qué es el modelado vascular y por qué lo usaríamos?

El modelado vascular es una nueva herramienta que mejora el conocimiento de la anatomía y fisiología del sistema vascular y simplifica la planificación de las intervenciones vasculares.

## Diferentes modalidades de modelado vascular

1. Al considerar el **sistema venoso**, con el modelado 3D podemos tener varios objetivos:

1.1 El modelado morfológico se utiliza para:

1.1.1 Investigación por venografía TC multicorte (VTMC) de pacientes con enfermedad venosa crónica:<sup>1-2</sup>

Este modelado es muy útil en caso de venas varicosas recurrentes después de la cirugía, especialmente en la fosa poplítea, en pacientes con anatomía venosa compleja y malformaciones venosas.

En todos estos casos, es esencial lograr adicionalmente un mapeo hemodinámico venoso por ultrasonido Doppler color.

Pero la VTMC provee con más precisión información morfológica 3D sobre toda la red venosa, y en particular del sistema profundo.

Por lo tanto, pensamos que la VTMC debería ser considerado un poderoso navegador para la cirugía de várices, proporcionando una hoja de ruta complementaria para la cirugía.<sup>3,4</sup>

Para ello, la reconstrucción 3D se logra por medio de una técnica de representación volumétrica (TVR) con la ayuda del software<sup>5</sup> Osirix®.

1.1.2 Para la educación de la anatomía venosa:

El modelado 3D es una buena herramienta educativa para los estudiantes que están aprendiendo la anatomía venosa, la más compleja de la anatomía humana.<sup>6</sup>

Tiene un número de aplicaciones en el campo de las ciencias morfológicas, en adición a las clásicas

técnicas de disección anatómica. También es una nueva y poderosa herramienta de investigación.<sup>7</sup>

En función de desarrollar estas nuevas herramientas y crear asociaciones entre universidades, hemos creado en 2015, con el Profesor Vincent DELMAS (presidente), una Cátedra UNESCO de anatomía digital. Para más información ver el sitio web: <http://www.anatomieunesco.org/>. De hecho, la mejor manera de construir esta base de datos anatómicas 3D es mediante expertos en anatomía y no en gráficos computarizados.

Para este propósito, es necesaria una segmentación anatómica antes de construir los modelos vectoriales 3D. Esto se hace con la ayuda de programas informáticos específicos.<sup>8,9</sup> El objetivo es construir un atlas informático interactivo del cuerpo humano, particularmente mediante el uso de cortes anatómicos.<sup>10,11</sup> El manejo de estos modelos realistas 3D provee una nueva herramienta educativa para estudiantes: la mesa de disección virtual.<sup>12</sup>

Para la práctica diaria de flebólogos y cirujanos, los atlas venosos interactivos 3D son particularmente útiles para comprender la complejidad de la anatomía venosa, y el enorme número de variantes anatómicas.

En la práctica, la mejora de nuestros conocimientos anatómicos mejorará la calidad de nuestros mapas venosos, que son la piedra angular de la toma de decisiones y la guía del tratamiento.<sup>3</sup>

1.1.3 Modelado para simulación en cirugía hepática:

El modelado 3D de los vasos y reconstrucción de la segmentación del hígado<sup>13</sup> se introducirá próximamente en selectas disciplinas quirúrgicas, en particular la cirugía hepática.

El objetivo del modelado 3D del hígado incluye simulaciones computarizadas con fines formativos y realidad aumentada.<sup>14,15</sup>

Estas nuevas herramientas informáticas interactúan con imágenes médicas para la planificación quirúrgica<sup>16,17</sup> y formación para evaluar la aptitud de los cirujanos para la práctica. Los modelos 3D también pueden guiar la misión de micro-robots en intervenciones hepáticas o abdominales mínimamente invasivas.

1.2 El modelado matemático del sistema venoso tiene un objetivo totalmente diferente: simular la función venosa global,<sup>18,19</sup> con el fin de evaluar virtualmente los beneficios de los tratamientos<sup>20,21</sup> propuestos ante la enfermedad venosa crónica: es un software llamado "simulador de retorno venoso" (SRV).

**1.3** DAAC (Disección Anatómica Asistida por Computadora):

Es una nueva herramienta de investigación que permite la reconstrucción en 3D del sistema venoso del embrión humano. Esta técnica fue utilizada originalmente para estudiar la anatomía de los nervios pelvianos,<sup>22-23</sup> pero también es muy precisa para el sistema venoso del embrión.<sup>24, 25</sup>

**2.** Al considerar el sistema arterial:

El modelado 3D se utiliza para evaluar y cuantificar con precisión la morfología arterial, en particular en el uso de la realidad aumentada antes de los procedimientos endovasculares<sup>26, 27</sup> la segmentación semiautomática de vasos es ahora posible con paquetes de software especiales.<sup>28, 29</sup> Esto proporciona una simulación de las cirugías endovasculares, ayuda en la planificación preoperatoria y en la formación quirúrgica,<sup>30</sup> y permite ensayar antes de las operaciones.<sup>31</sup>

## Las técnicas de modelado vascular

**1.** Modelado morfológico del árbol vascular:

Existen dos técnicas diferentes disponibles para reconstrucciones 3D: renderizado (volumétrico) de

volumen (también llamado TRV) y el modelado vectorial (también llamado renderizado superficial).

**1.1.** Renderizado de volumen o TRV (usando datos digitales de venotomografía computarizada multicorte).<sup>1,2</sup>

Los pasos principales de la técnica directa de renderizado de volumen<sup>1-25</sup> son la adquisición, reconstrucción y posprocesado de datos:

Adquisición de datos: una Tomografía computarizada multicorte y multidetector (64 y ahora 128 detectores) es usada, produciendo de 600 a 1200 cortes por series durante unos 30 segundos. (ver Tabla 1 para detalles del protocolo).

La sincronización de la inyección es crítica: la inyección de contraste debería comenzar unos 40-60 segundos antes, y luego tiene que ser sincronizada a fin de que termine al final de la adquisición.

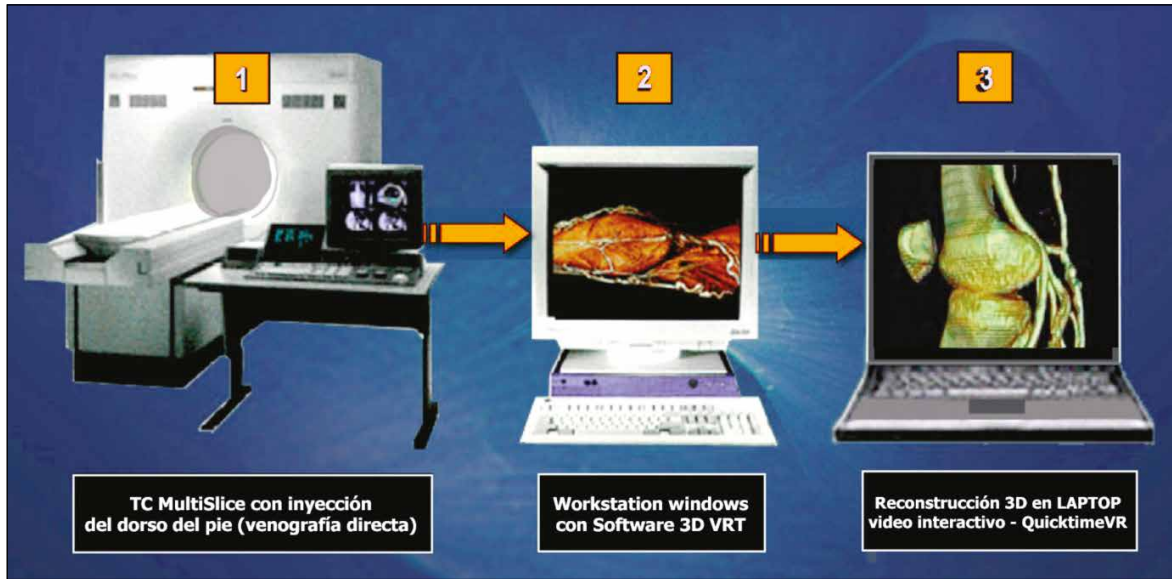
El paciente está acostado boca arriba (en su espalda, pies primero), con ningún punto de contacto con la mesa, excepto las nalgas y los talones. Es importante evitar cualquier compresión de la pantorrilla y muslo posterior durante el tiempo de adquisición. El paciente tiene que sostener la respiración perfectamente durante este corto tiempo y a menudo se le pide que haga una maniobra de Valsalva.

**Tabla 1. Protocolos de TC multicorte.**

| Protocolos   | Adquisición   | Reconstrucción  | Post proceso  | Inyección de contraste   |
|--|---|---|---|--|
| TC 16 detectores:<br>600 cortes en<br>25 segundos      | 120 kV 150 mAs,<br>colimación de corte:<br>16 x 1,5 mm,<br>Matrix 512<br>Fov 380 mm | Cortes de<br>2 x 1,5 mm<br>Filtro b30<br>Matrix 512 x 512<br>Zoom 1,7                                       | Renderizado volumétrico (TRV)<br>Rápido y automático<br>con transparencias de tejidos | Medrad TCMC sistema de inyección<br>Fase simple inyección de 20 ml de contraste iodado y 180 ml de solución - venopuntura de la vena dorsal del pie o de cierta várice del muslo |
| TMC de 64 detectores<br>1000 cortes en<br>20 segundos  | 120 kV<br>150 mAs   | Cortes de<br>1 x 0,75 mm<br>Matrix de 512<br>Zoom 1,7   | TRV   |  |
| TMC de 128 detectores<br>1000 cortes en<br>10 segundos | 100 kVp<br>Colimación de<br>128 x 0,6 mm  | Tiempo de rotación<br>300 milisegundos<br>Hélice continua<br>Técnica de Mindose® corte<br>Pitch = 0,16-0,22 | TRV con PC usando multiprocesadores<br><br>Osirix® usando tarjetas gráficas rápidas   | Inyección proximal y bifásica para visualizar las venas pelvianas  |

**CT)** calculada tomografía, **TCMC)** Multicorte CT, **FOV)** campo de visión, **TRV)** representación de volumen.

**Figura 1.** Los 3 pasos principales de la técnica directa.



Venografía por TC multicorte (VTMC):

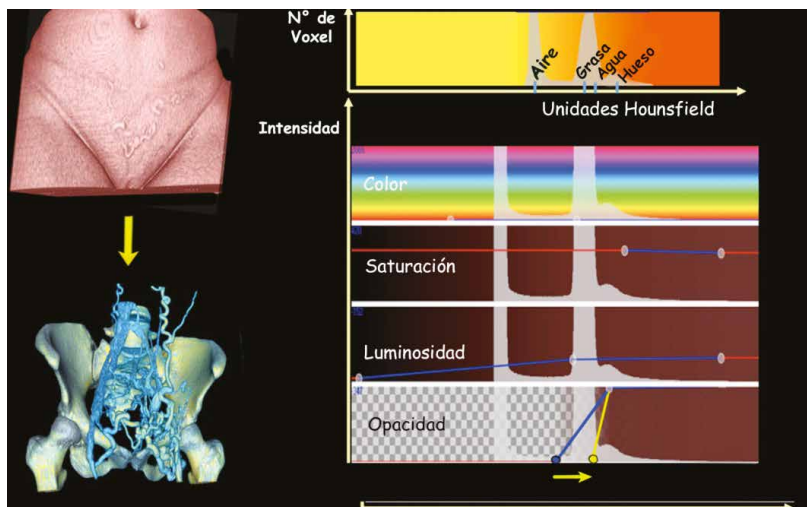
1. CT multicorte con inyección en el dorso del pie (venografía por TC directa).
2. Ventanas de estación de trabajo con software 3D VRT.
3. Reconstrucción 3D en LAPTOP, video interactivo QuickTime VR.

Reconstrucción de datos: los datos brutos se procesan para realizar la reconstrucción de los cortes. Ver protocolos usuales en la Tabla 1, de 16 a 128 detectores.

Posprocesado de los datos: se interpreta la reconstrucción 3D del sistema venoso. Los datos son normalmente enviados por intranet a una estación de trabajo dedicada para el posprocesamiento mediante software específico de reconstrucción 3D.

Luego, los videos 3D interactivos pueden exportarse a un ordenador portátil.

El principio de la técnica TRV es utilizar una tabla predeterminada (LUT) estableciendo una correspondencia entre los niveles de densidad y los colores (Figura 2). La selección del umbral hace posible aislar algunos elementos anatómicos acorde a su densidad específica: piel, tejido adiposo, músculos, vasos (inyección) y huesos.



**Figura 2.**

El principio de la técnica de renderizado volumétrico (TRV) es elegir un umbral para seleccionar una muestra de densidades en el histograma correspondiente a la densidad de ciertas estructuras anatómicas específicas. Véase la **flecha amarilla** en el fondo modificando la opacidad, la cual hace la piel y los músculos transparentes (**imagen inferior izquierda**).

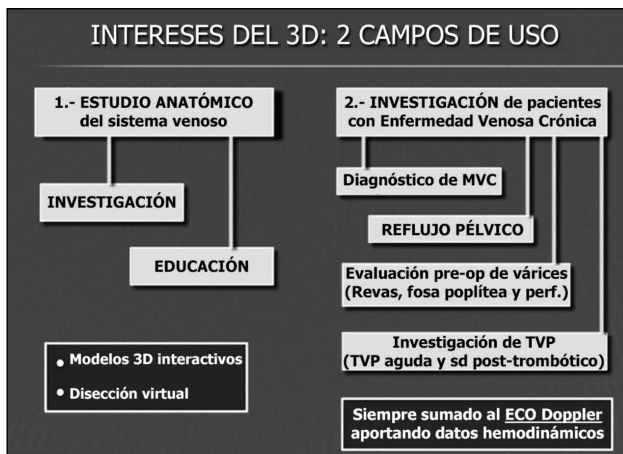
Las principales indicaciones de VTMC en enfermedad venosa crónica (EVC) se muestran en la Figura 3.

Un dedicado software puede producir una realista reconstrucción 3D de la anatomía:

Osirix® para ordenador Mac<sup>5</sup> - Asistente de volumen, Syngo VRT (Siemens), Voluson 4Dview (GE), Philips, Infinix-i Volume Navigation (Toshiba).

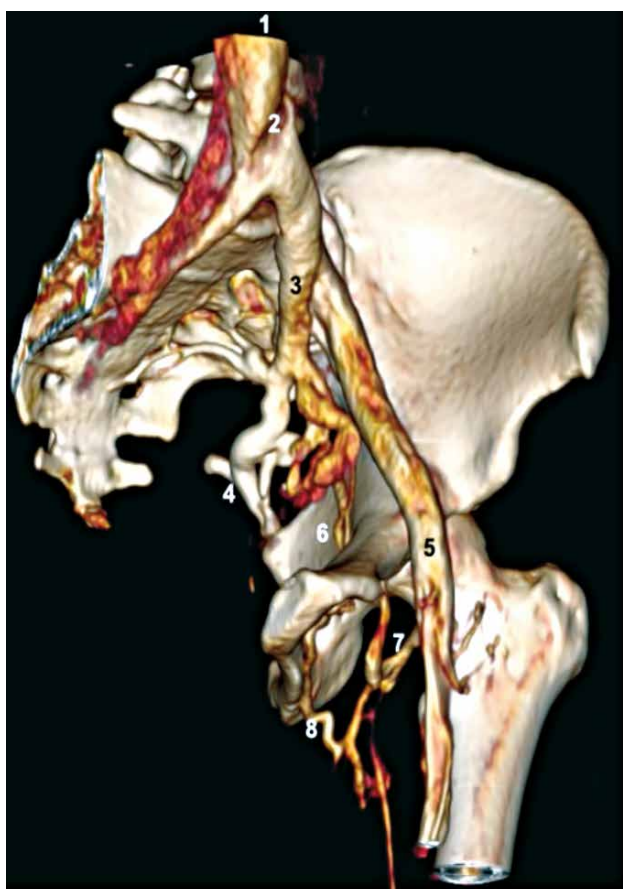
Las ventajas de TRV son las automáticas y rápidas reconstrucciones 3D con umbrales preseleccionados y segmentación vascular automática, pero se necesitan poderosas computadoras para manejar las enormes series de datos.

Resultados:<sup>6,2</sup> un ejemplo de reconstrucción 3D de la red venosa en el caso de un paciente que sufre de reflujo de venas pélvicas (Figura 4).



**Figura 3.**

Los dos campos de uso del modelado en 3D del sistema venoso por VTMC.



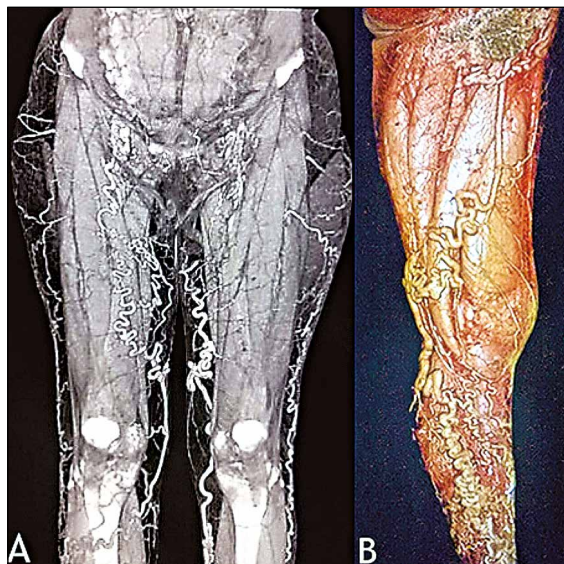
**Figura 4.**

Venografía TC con reconstrucción 3D por TRV. Esta mujer tiene reflujo pélvico de la vena obturatriz (6) y un pseudo síndrome de May-Turner (2).

- 1) Cava inferior, 2) impresión de la arteria iliaca común derecha, 3) vena iliaca interna, 4) vena glútea inferior, 5) vena femoral común izquierda, 6) vena del obturador, 7) vena circunfleja posterior, 8) anastomosis entre vena circunfleja posterior y vena obturatriz.

Por último, en la Figura 5 se observa con la técnica de angioTC indirecta con precisión la vinculación que tienen las venas perforantes en la recidiva varicosa (A) y recidiva varicosa por vena safena anterior (B).

**Figura 5.** Reconstrucción tridimensional de CVT por VRT indirecto. **A)** Perforantes y recidiva varicosa, **B)** vena safena anterior y recidiva varicosa.



**1.2. Modelado vectorial.**<sup>7</sup> (Renderizado de superficie con raytracing).

Para ello podemos utilizar datos analógicos (por ejemplo, cortes anatómicos), pero requiere una seg-

mentación (manual o semiautomática) de las estructuras anatómicas.

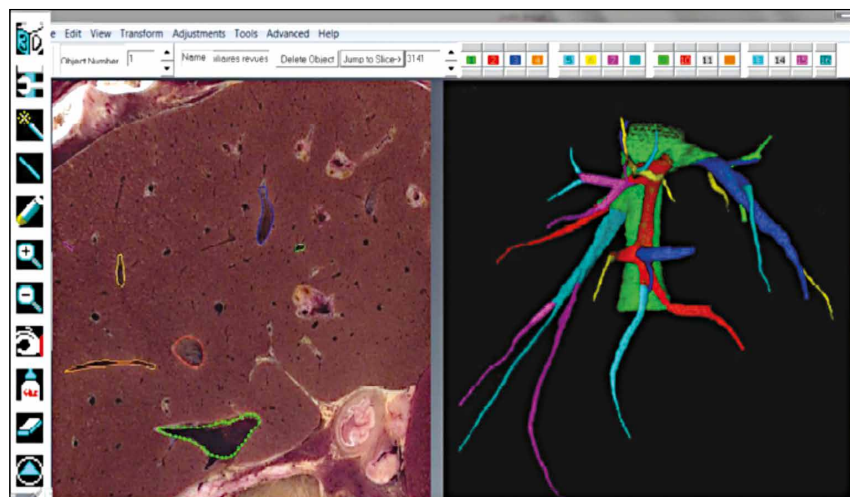
Winsurf® software<sup>8</sup> (anteriormente llamado Surfdriver) podría usarse para construir el modelo vectorial. Se da un ejemplo de la pantalla del software durante la segmentación anatómica del hígado (Figura 5): Segmentación por Photoshop® y luego el uso de softwares Mimics® (<http://biomedical.materialise.com>) han sido utilizados por el equipo de Korean Visible (<http://vkh.ajou.ac.kr/#vk>).

La pantalla del modelo utiliza un software CAD especial (3Dstudio max®, Cinema4Dxl®, Cinema4Dxl Autocad®, Autocad Amira®, Amira Blender®, Blender Maya®, Maya...). Conversión desde winsurf® en Acrobat Archivo 3D pdf permite la manipulación interactiva de modelos anatómicos en 3D.

Resultados: la creación de atlas educativo interactivo de anatomía y simulación.

Esto conduce al uso de una mesa de disección virtual interactiva: una mesa computarizada que permite a los estudiantes hacer fácilmente disecciones virtuales del cuerpo humano. Es una poderosa herramienta para la formación de estudiantes de medicina: una pantalla multitáctil del tamaño de una camilla del cuerpo humano que te permite explorar, diseccionar y comprender partes y sistemas del cuerpo.

Mientras Anatomage® ([www.Anatomage.com](http://www.Anatomage.com)) utiliza un costoso dispositivo y sofisticado software, la disección virtual también podría lograrse con una gran pantalla táctil funcionando con Acrobat3D pdf de forma sencilla<sup>13</sup> (Figura 6). La gran ventaja es que el software de lectura Acrobat® está disponible gratis para cualquier ordenador.



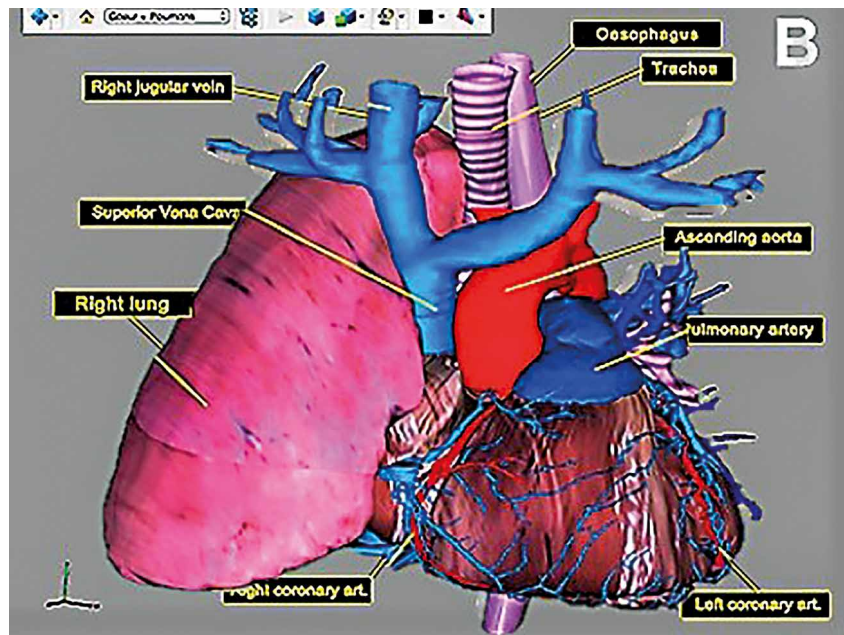
**Figura 6.** Ventana de interfaz del software Winsurf® mostrando la segmentación coloreada de las venas hepáticas del corte anatómico (Korean Visible Human) usando los canales de color. El modelo vectorial 3D resultante se muestra a la derecha (incluyendo la escala de color).

1.3. El modelado vascular para cirugía hepática tiene varias aplicaciones útiles:

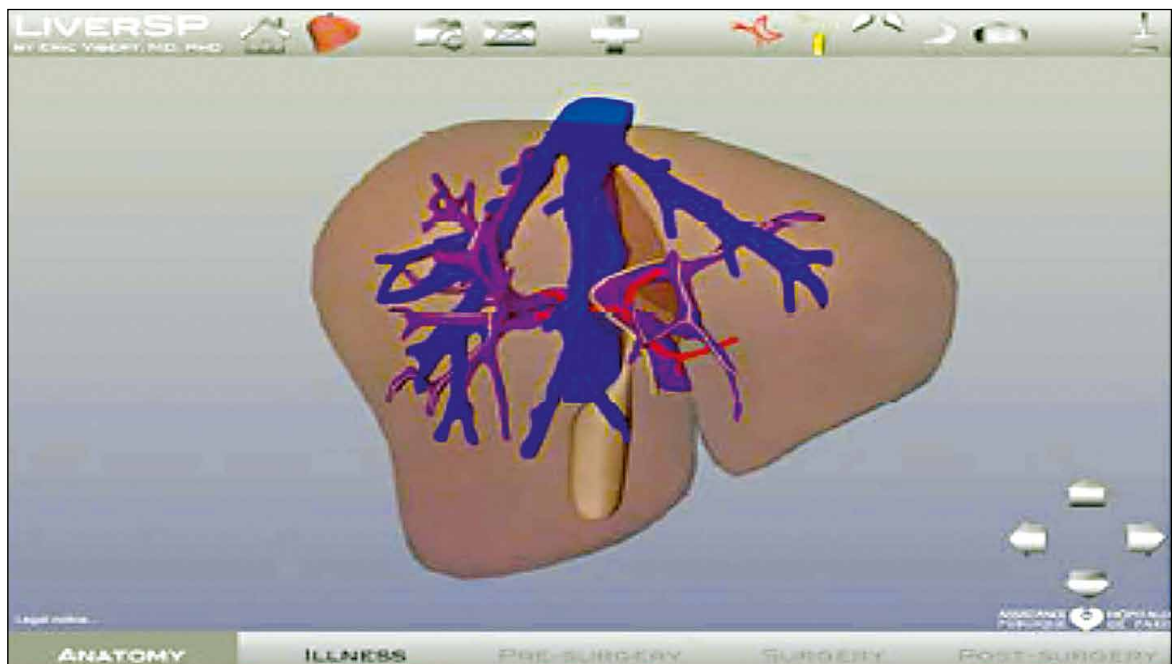
- Planificación quirúrgica en cirugía hepática.<sup>14</sup>
- Realidad aumentada para la cirugía hepática mínimamente invasiva.<sup>15</sup>
- Planificación de la cirugía hepática para el carcinoma hepatocelular (Figura 8).

- Planificación de trasplantes hepáticos.
- Planeación Visible del Paciente (IRCAD) (Appstore para ipad, iphone).
- VP Planning es un software de computación para Mac y PC para ayudar a la planificación quirúrgica. (<https://www.visiblepatient.com/fr/>)

**Figura 7.**  
Ventana de interfaz del lector Acrobat® mostrando el modelo 3D final del corazón y pulmones, que podrían ser manejados interactivamente mediante las etiquetas. Cada estructura anatómica (a la izquierda) podría ser visualizada por separado.



**Figura 8.**



2. Modelado matemático en 3D de la red venosa para simulación.<sup>12-13</sup>

El objetivo es construir un modelo virtual, el simulador de retorno venoso<sup>12</sup> (SRV), diseñado para calcular las variaciones hemodinámicas venosas cuando se aplica un dispositivo de compresión en la pierna.

El simulador de retorno venoso (SRV) es un paquete de software diseñado para simular los parámetros hemodinámicos venosos de las extremidades inferiores. Es una red virtual (digital) de la extremidad inferior que calcula en condiciones estáticas y dinámicas las diferentes variables (tasa de flujo, diámetro venoso y presión interna) para una presión externa definida.

Es un modelo matemático que resuelve las ecuaciones que gobiernan el flujo sanguíneo, aplicado a la red venosa de los miembros inferiores.

Con este fin, se usa un modelo simplificado de la red venosa (Figura 9).

El software tiene en cuenta la longitud y el calibre de las venas, su distensibilidad, la viscosidad de la sangre, la función valvular (normal o patológica), la posición y actividad del sujeto (de pie, caminando, acostado) y la presión externa aplicada a las venas: contracción muscular, uso de medias compresivas medicinales.

Como resultado, el software da el calibre, presión y tasa de flujo para cualquier punto de la red virtual.

El ajuste de los parámetros se basó en los datos fisiológicos de la literatura, y la validación del software VRS17 se publicó mostrando que la presión venosa distal en reposo y durante el ejercicio son similares a las presiones reales medidas in vivo en sujetos sanos y en diferentes casos de incompetencia valvular.

Por lo tanto, el VRS puede ser considerado como una fiable herramienta de simulación.

Se ha utilizado para evaluar el efecto de las medias de compresión medicinales en el retorno venoso. Un estudio ha demostrado el impacto de los diferentes niveles de compresión en el reflujo venoso safeno distal.

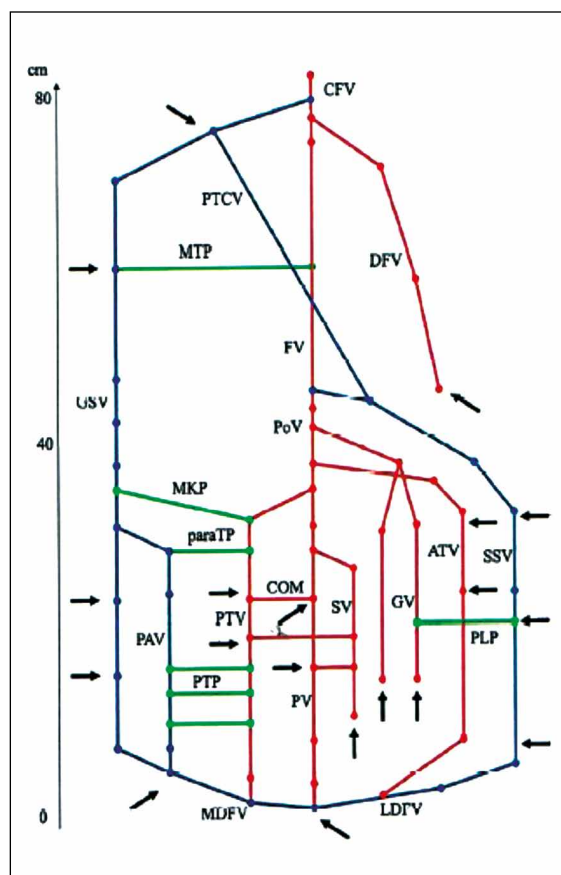
Se realizó otro estudio para simular el edema<sup>19</sup> venoso.

En el futuro, el SRV también podría utilizarse para predecir las consecuencias hemodinámicas de la cirugía venosa y de otras intervenciones venosas.

3. CAAD (Dissección Anatómica Asistida Computarizadamente):

Los métodos de estudio anatómicos clásicos tienen limitaciones relativas a la microanatomía de la localización de vasos y nervios.

Figura 9. Representación bidimensional de la red venosa de los miembros inferiores utilizada en el modelo de simulación del software de VRS®.



Las venas profundas están en rojo, la superficie en azul y las venas perforadoras en verde. **CFV)** vena femoral común, **DFV)** vena femoral profunda, **PoV)** vena poplítea, **G)** Giacomini, **PTV)** tibial posterior, **ATV)** tibial anterior, **GV)** vena del gástronecnio, **SV)** músculo soleo, **MDFV)** vena medio-dorsal del pie, **LDFV)** vena dorsolateral del pie, **COM)** perforadores, **MTP)** perforador medial del muslo, **MKP)** perforador medial de la rodilla para, **TP)** perforador paratibial, **PTP)** perforador tibial posterior, **PLP)** perforador posterior de la pierna.

La combinación de métodos inmunohistoquímicos y reconstrucciones tridimensionales podría ser usada para resolver estas limitaciones de las ciencias morfológicas. La técnica de disección anatómica asistida por computadora (CAAD) es un método original aplicado en la ciencia morfológica.

Creado originalmente por Yucl<sup>17, 18</sup> para describir la topografía de los nervios perineales, el CAAD fue la primera herramienta aplicada en nuestra unidad de investigación URDIA por Karam et al. para



estudiar la distribución de los nervios de la uretra<sup>19</sup> e intra-pélvicos,<sup>22, 18</sup> y luego también para la completa reconstrucción de los miembros inferiores de un joven embrión humano.<sup>22</sup>

**Material y métodos:** cortes transversales secuenciales de una porción de la pelvis del embrión y de sus miembros inferiores fueron tratados inmunohistoquímicamente y digitalizados con escáner de alta resolución óptica. Los nervios estaban teñidos por marcador inmunológico Proteína S100 y los vasos por D240.

Las secciones fueron alineadas con el software Photoshop®, luego se logró una reconstrucción tridimensional mediante segmentación manual de las estructuras anatómicas usando el WinSurf®, versión de software 3.5.

**Resultados:** esto produjo un modelo realista vectorial 3D de la pelvis y miembros inferiores.

En cuanto a la pelvis, la reconstrucción tridimensional de una serie de cortes histológicos teñidos mediante marcadores inmunológicos permite identificar estructuras precisas y las inervaciones de todos los órganos intrapélvicos demostrando la localización exacta de las vías adrenérgicas y colinérgicas.<sup>20, 21</sup> Se podría realizar una disección virtual para cada una de las estructuras pélvicas. Podríamos describir la localización precisa del plexo hipogástrico inferior, así como la naturaleza y la distribución de sus fibras (Figura 10).

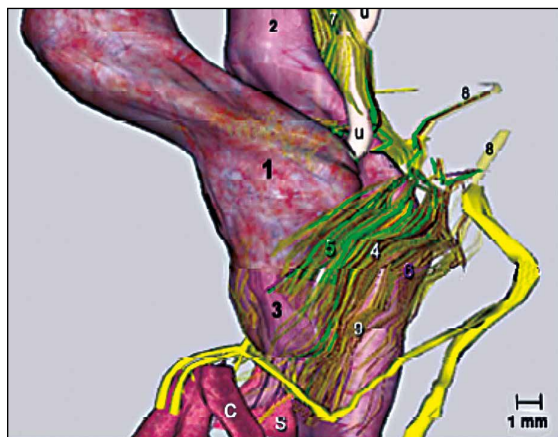
La evolución del CAAD confirmó y clarificó la topografía y la anatomía quirúrgica de las inervaciones intrapélvicas. Esta técnica representa un método original en la investigación anatómica y una gran herramienta educativa para los cirujanos con el fin de mejorar la comprensión de la anatomía de una inaccesible región mediante técnicas convencionales.

En cuanto a los miembros inferiores, la reconstrucción 3D de las extremidades enteras produce una disección virtual de los músculos, nervios y vasos sanguíneos, lo cual es una valiosa herramienta para el estudio de la embriogénesis de los nervios y del sistema vascular del embrión humano<sup>22</sup> (Figura 11), especialmente de la red venosa. De hecho, hoy en día, no hay una observación directa que muestre los diferentes pasos de la organogénesis venosa del embrión humano.

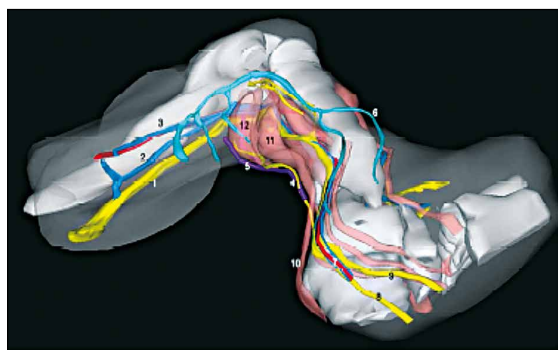
#### 4. Modelado 3D del sistema arterial:

El uso principal de la reconstrucción tridimensional de las arterias desde hace años es la investigación de la reconstrucción arterial tridimensional, utilizando la angiografía por TC que tradicionalmen-

**Figura 10.** Disección anatómica asistida por ordenador de la pelvis fetal humana masculina de 17 semanas, vista lateral del plexo hipogástrico inferior (4), fibras adrenérgicas (5) en verde y colinérgicas (6) en púrpura, nervios hipogástricos (7) y nervios pélvicos espláncnicos (8) contienen ambos tipos de fibras, fibras adrenérgicas mayormente en la parte superior del plexo, fibras colinérgicas concentradas en la porción inferior. 1) Vejiga, 2) recto, 3) próstata, C) cuerpo cavernoso, S) cuerpo esponjoso, U) uréter, 9) nervio cavernoso.



**Figura 11.** Reconstrucción tridimensional de un miembro inferior izquierdo fetal de 14 semanas: 1) nervio ciático, 2) vena axial, 3) vena y arteria femoral, 4) nervios surales, 5) vena safena menor, 6) vena safena mayor, 7) vasos tibiales posteriores, 8) nervio tibial lateral, 9) nervio tibial medio, 10) tendón de Aquiles, 11) músculo soleo, 12) gastrocnemio medio.



te se ha usado en pacientes con enfermedad arterial periférica.

Adicionalmente, el análisis Doppler color puede evaluar mejor las lesiones arteriales cuantificando el flujo en áreas de estenosis o dilatación, permitiendo una mejor elección de opciones de tratamiento.

Más recientemente, un nuevo campo de aplicación del modelado arterial en 3D surgió con la apa-

riación de procedimientos endovasculares y técnicas quirúrgicas<sup>28</sup> mínimamente invasivas.

Nuevos algoritmos fueron desarrollados para mejorar la calidad de la reconstrucción 3D y acortar el tiempo de computación.

Algunos programas están proporcionando funciones de segmentación y simulación: Mevislab es un procesador de imágenes médicas y un visualizador descargable gratis en [www.mevislab.de](http://www.mevislab.de). Representa una poderosa herramienta para la investigación y el desarrollo del procesamiento de imágenes con un enfoque especial en imagenología médica. Permite la rápida integración y prueba de nuevos algoritmos y el desarrollo de prototipos de aplicaciones clínicas. El paquete de software para herramientas de modelado vascular 3D (VMTK [www.vmtk.org](http://www.vmtk.org)) es una colección de bibliotecas y herramientas para la reconstrucción 3D, análisis geométrico, generación de malla y análisis de datos de superficie para el modelado basado en imágenes de vasos sanguíneos.

El modelado 3D es una especie de revolución en el manejo de la enfermedad vascular. Es una fantástica herramienta nueva que ayuda en gran medida al cirujano en la planificación quirúrgica, simulación, entrenamiento y realidad aumentada.<sup>36</sup>

Planificación quirúrgica:

Mediante el uso de dedicados programas de simulación, se mejora la preparación para un procedimiento endovascular: utiliza los datos específicos de la TC del paciente del día previo a la operación, y luego se realiza un ensayo que es reproducible y fiable.

La simulación y entrenamiento de procedimientos endovasculares:

Es, en efecto, un nuevo paradigma para la formación vascular. La simulación endovascular mejora los resultados cuantitativos y cualitativos de la actividad de los residentes de cirugía general que realizan diagnósticos angiográficos, en un estudio aleatorio<sup>24</sup> controlado (Chaer *et al.* 2006).

La simulación endovascular también ha demostrado su eficacia y competencia en el procedimiento torácico endovascular en la reparación aórtica (TEVAR).<sup>31</sup>

Varias opciones de las estaciones de simulación y los módulos de disección son propuestas en internet (conocimiento endovascular blog en [www.mentice.com](http://www.mentice.com)).

La realidad aumentada<sup>24</sup> para una cirugía endoscópica mínimamente invasiva:

Los nuevos avances tecnológicos en óptica, ins-

trumentación, robótica e informática ofrecen al cirujano nuevas posibilidades y capacidades: tecnologías de realidad aumentada ahora proporcionan orientación y navegación durante la intervención quirúrgica. Además, los dispositivos robotizados pueden mejorar las capacidades del cirujano en términos de destreza y precisión.

Por último, se ha alcanzado la personalización de stents vasculares en particular para la aorta. Los personalizados injertos de stents aórticos son específicos de cada paciente en el sentido de que ellos conforman la parte de la aorta ascendente, arco aórtico y/o aorta torácica. El modelo 3D de la endoprótesis vascular se basa en una imagen tridimensional de la anatomía del paciente (patentes presentadas en 2013: EP2903561A1, US20150209162).

## Conclusiones

El modelado 3D vascular nos ha traído recientemente una revolución en el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades vasculares.

Para las venas, la venografía por TC es una nueva herramienta cartográfica en adición al ultrasonido Doppler color.

Para las arterias, es una verdadera revolución para los tratamientos endovasculares, la planificación quirúrgica, entrenamiento y técnicas de realidad aumentada.

Es también una notable herramienta de aprendizaje para toda la anatomía humana.

## Referencias

1. Uhl JF, Gillot C, Verdeille S, Martin-Bouyer Y, Muggel T. Three dimensional CT-Venography: a promising tool to investigate the venous system. *Phlebology* 2002; 38: 74-80.
2. Uhl JF, Chahim M, Verdeille S, Martin-Bouyer Y. The 3D modeling of the venous system by MSCT venography (CTV): technique, indications and results. *Phlebology* 2012; 27: 270-288.
3. Uhl JF. The new strategies for the varicose veins surgery (in French) *E-mémoires de l'Académie Nationale de Chirurgie* 2009; 8 (1): 12-22.
4. Min SK, Kim SY, Park YJ, Lee W, Jung IM, Lee T, Ha J, Kim SJ. Role of three-dimensional computed tomography venography as a powerful navigator for varicose vein surgery. *J Vasc Surg.* 2010; 51 (4): 893-899.
5. Rosset A, Spadola L, Ratib O. OsiriX: An Open-Source Software for Navigating in Multidimensional DICOM Images. *Journal of Digital Imaging* 2004; 17: 205-216.

6. Uhl JF, Gillot C. Embryology and three-dimensional anatomy of the superficial venous system of the lower limbs. *Phlebology* 2007; 22 (5): 194-206.
7. UHL JF, Plaisant O, Ami O, Delmas V. La modélisation 3D en morphologie: méthodes, intérêt et résultats. *Morphologie* 2006; 90: 5-20.
8. Moody D, Lozanoff S. Surfdriver: A practical computer program for generating three-dimensional models of anatomical structures. 14th Annual Meeting of the American Ass. of Clinical Anatomists, July 8-11, 1997. Honolulu, Hawaii.
9. Dong Sun Shin, Min Suk Chung, Jin Seo Park et al. Portable Document Format File showing the surface models of cadaver whole body. *J Korean Med Sci* 2012; 27: 849-856.
10. Soler L, Delingette H, Malandain G et al. An automatic virtual patient reconstruction from CT-scans for hepatic surgical planning. *Stud Health Technol Inform* 2000; 70: 316-322.
11. Marescaux J. Augmented reality for minimally invasive liver surgery (VR-planning). *Journal of Gastroenterology and Hepatology Research* 2013; 2 (5): 555-560.
12. Fullana J-M, Cros F, Becker F, Ouchene A, Partsch H. The venous return simulator: an effective tool for investigating the effects of external compression on the venous hemodynamics - first results after thigh compression. *Vasa* 2005; 34: 19-23. DOI: 10.1024/0301-1526.34.1.19.
13. Chauveau M, Fullana J-M, Gelade P, Vicaut E, Flaud P. Simulation numérique de l'oedème veino-lymphatique et des effets de la compression. *Journal des maladies vasculaires* 2011; 36 (1): 9-15.
14. Chauveau M, Gelade P, Cros F. The venous return simulator: comparison of simulated with measured ambulatory venous pressure in normal subjects and in venous valve incompetence. *Vasa* 2011; 40: 205-217.
15. Chauveau et al. Taille des bas de compression médicale et hémodynamique veineuse. Quelles sont les conséquences d'une taille mal adaptée? Les produits de série de classe 2 proposés par les fabricants français sont-ils adaptés à la population? *Phlébologie*, 2011; 64 (4): 1-8.
16. Yucel S, Baskin LS. Neuroanatomy of the male urethra and perineum. *BJU international* 2003; 92: 624-630.
17. Yucel S, Baskin LS. Identification of communicating branches among the dorsal, perineal and cavernous nerves of the penis. *J Urol* 2003; 170 (1): 153-158.
18. Karam I, Droupy S, Abd-Alsamad I et al. Innervation of the female human urethral sphincter: 3D reconstruction of immune - histochemical studies in the fetus. *Eur Urol* 2005; 47 (5): 627-633.
19. Alsaid B, Bessede T, Diallo D, Karam I, Uhl J-F, Delmas V, Droupy S, Benoît G. Computer-assisted anatomic dissection (CAAD): evolution, methodology and application in intra-pelvic innervation study. *Surg Radiol Anat* October 2012; 34 (8): 721-729.
20. Balaya V, Uhl JF, Lanore A et al. Three-dimensional modeling of the female pelvis by Computer-Assisted Anatomical Dissection: Applications and perspectives. *J Gynecol Obstet Biol Reprod (Paris)*; 2016.
21. Kurobe N, Hakkakian L, Chahim M, Delmas V, Ve-kemans M, Uhl JF. Three-dimensional reconstruction of the lower limb's venous system in human fetuses using the computer-assisted anatomical dissection (CAAD) technique. *SRA 2014 DOI: 10.1007/s00276-014-1350-2*.
22. Kendrick DE, Gosling AF, Nagavalli A, Kashya VS, Wang JC. Endovascular Simulation Leads to Efficiency and Competence in Thoracic Endovascular Aortic Repair Procedures. *Journal of Surgical Education* 2015.
23. Lamata P, Ali W, Cano A et al. Augmented Reality for Minimally Invasive Surgery: Overview and Some Recent Advances. In Soha Maad (Ed), *Augmented Reality*, ISBN 978-953-7619-69-5, pp. 230, January 2010, INTECH, Croatia, downloaded at [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com).
24. Antoniou GA, Riga CV, Mayer EK. Clinical applications of robotic technology in vascular and endovascular surgery. *J Vasc Surg* 2011; 53: 493-499.
25. Uhl JF, Verdeille S, Martin-Bouyer Y. Pre-operative assessment of varicose patients by veno-CT with 3D reconstruction 3rd International workshop on multislice CT 3D imaging. *Springer Verlag Ed Pavone, Debatin* 2003: 51-53.
26. Uhl JF, Caggiati A. In Catalano C, Passariello R. 3D evaluation of the venous system in varicose limbs by multidetector spiral CT Multidetector row CT angiography. (Eds.) *Springer* 2005: 199-206.
27. Karam I, Droupy S, Abd-Alsamad I et al. The precise location and nature of the nerves to the male human urethra: histological and immune-histochemical studies with threedimensional reconstruction. *Eur Urol* 2005; 48 (5): 858-864.
28. Uhl JF. Focus on embryogenesis of the venous system of the lower limbs. *Phlebolympology* 2015; 22 (2): 55-62.
29. Willaert WIM, Aggarwal R, Nestel DF et al. Patient specific simulation for endovascular procedures: qualitative evaluation of the development process. *Int J. Med robotics comput assist surg* 2010; 6: 202-210.
30. Chaer R, DeRubertis BG, Lin S et al. Simulation Improves Resident Performance in Catheter-Based Intervention: Results of a Randomized, Controlled Study. *Annals of Surgery* 2006; 244 (3): 343-352.
31. Rudarakanchana N, Van Herzeele I, Desender L, Cheshire NJ. Virtual reality simulation for the optimization of endovascular procedures: current perspectives. *Vascular Health and Risk Management* 2015; 11: 195-202.