



VNIVERSIDAD D SALAMANCA

Grado de Medicina

Trabajo Fin de Grado

**Procesamiento de imágenes radiológicas
mediante 3D Slicer.**

**Anatomía del sistema musculoesquelético de la
articulación de la rodilla.**

2023-2024

Autor: Toranzo Benítez, Javier

Tutor: Santos Sánchez, José Ángel

Cotutor: Borrajo Sánchez, Javier

Índice

Resumen	3
Introducción.....	4
Justificación.....	7
Objetivos.....	8
Material y métodos	8
Resultados.....	10
Discusión	23
Conclusiones.....	27
Bibliografía.....	28
Anexo 1: Descripción radiológica de la anatomía de la rodilla.....	30

Resumen

Las pruebas de imagen se han convertido en una herramienta fundamental para el diagnóstico médico y la planificación quirúrgica. La tomografía computarizada (TC) y la resonancia magnética (RM) han experimentado numerosos avances en los últimos años, dando la posibilidad de obtener un modelo tridimensional (3D) a partir del postprocesado de los archivos obtenidos con estas pruebas mediante programas externos. Estos modelos en tres dimensiones en muchos casos facilitan la comprensión de la anatomía humana y la percepción de la patología que los pacientes puedan presentar.

Aunque la mayoría de los programas utilizados son de pago, también existen programas de acceso libre como *3D Slicer*. La utilización de *3D Slicer* para la segmentación de la articulación de la rodilla permite conocer la capacidad y precisión de este programa para crear reconstrucciones 3D que permitan el estudio anatómico del sistema musculoesquelético. Dicho software es utilizado por sí solo, sin algoritmos u extensiones que amplíen sus funciones.

Palabras clave: *3D Slicer*, segmentación, 3D, rodilla, musculoesquelético, articulación.

Abstract

Imaging tests have become a fundamental tool for medical diagnosis and surgical planning. Computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) have undergone numerous advances in recent years, providing the possibility of obtaining a three-dimensional (3D) model from the post-processing of the files obtained with these techniques, using external programs. These three-dimensional models often facilitate the understanding of human anatomy and the perception of any pathology that patients may present.

Although most of the programs used are paid programs, there are free access programs such as *3D Slicer*. The use of *3D Slicer* for the segmentation of the knee joint allows us to know the capacity and precision of this program in the creation of 3D reconstructions for the anatomical study of the musculoskeletal system. This software is used on its own, without algorithms or extensions to extend its functions.

Keywords: *3D Slicer*, segmentation, 3D, knee, musculoskeletal, joint.

Introducción

A lo largo de los años, con el fin de lograr una mejora en la calidad de vida del ser humano, la medicina ha ido evolucionando a través de descubrimientos e investigaciones que permiten una mayor profundización en el conocimiento, tanto de nuevas enfermedades como del propio organismo. Dentro de los diferentes campos que han facilitado mencionado progreso, cabe destacar la rama de la Radiología médica, la cual a pesar de que el descubrimiento de los Rayos X es relativamente reciente en 1895 por Wilhem C. Roentgen¹, no ha dejado de experimentar avances y progresos permitiendo implementarse su uso tanto para el diagnóstico como para la terapia de los pacientes.

La radiografía convencional (RX) es una de las principales pruebas de imagen utilizadas en el diagnóstico médico, por medio de radiaciones ionizantes, como son los Rayos X; puede obtenerse una imagen bidimensional que permite visualizar las diferentes estructuras del cuerpo humano en cinco densidades básicas (Tabla 1) acorde a la capacidad de cada tejido de absorber los rayos X.

AIRE	Absorbe la menor cantidad de rayos X, color negro o “más oscuro”.	
GRASA	Gris más oscuro que los tejidos blandos.	
AGUA (TEJIDOS BLANDOS)	Tanto líquidos como tejidos blandos tienen la misma densidad en la radiografía convencional.	
CALCIO	Material natural más denso, absorbe la mayor cantidad de rayos X.	
METAL	Generalmente absorbe todos los rayos X. color “más blanco”.	

Tabla 1. Densidades básicas de la radiografía convencional. Ordenados de menor a mayor densidad.

Presenta las ventajas de ser barata y poder realizarse en casi cualquier lugar (gracias a dispositivos portátiles), además los avances tecnológicos han permitido archivarlas y almacenarlas por medio de servidores en sistemas denominados PACS (*Picture Archiving, Communications and Storage*) facilitando el acceso a esta información desde cualquier lugar.

La sencillez y la baja radiación hacen que la RX sea una herramienta básica en el diagnóstico y seguimiento del paciente en patologías de tórax, abdomen y pelvis e incluso del sistema musculoesquelético, valorando fundamentalmente lesiones que afectan al

hueso (fracturas, osteomielitis o lesiones tumorales) y a los extremos articulares (luxaciones).

A pesar de ser una técnica de imagen muy utilizada, no es siempre la más adecuada ya que cuenta con dos limitaciones fundamentales; la superposición de estructuras en un mismo plano debido a que trata de una técnica proyeccional y la escasa resolución de contraste (capacidad de distinguir diferentes escalas de grises o densidades muy próximas entre sí) que impide una adecuada discriminación de las partes blandas. La limitación de ambos parámetros hace que la interpretación de la imagen sea difícil a la hora de estudiar diferentes tejidos².

Normalmente, es necesario recurrir a pruebas más complejas y tomográficas, que nos permitan un estudio más detallado, destacando la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM), cuyo uso facilita la descripción anatómica y la detección de patologías que con el uso de una RX no podríamos visualizar. Tanto la RM como la TC permiten un estudio tridimensional y pueden ser complementadas con el uso de contraste permitiendo ver estructuras que por sí solas no serían distinguibles.

En el caso de la TC, utiliza un tubo de rayos X que rota alrededor del paciente y un sistema de detectores capta la radiación atenuada cuando ésta atraviesa los tejidos desde diferentes ángulos. Permite obtener una imagen tridimensional constituida por los volúmenes del paciente, dicha imagen está dividida en cuadrículas que reciben el nombre de matriz, formada cada una de ellas por miles de píxeles. A cada píxel de la imagen del TC se le asigna un valor en función de la atenuación de la radiación³, entre -1000 y +1000 Unidades Housefield (UH). El aire presenta un valor de -1000 UH, mientras que el hueso asocia un valor de 400 a 600 UH. Toda esta información obtenida es procesada a través de técnicas como la reconstrucción multiplanar (MPR) que posibilita la visualización de imágenes además del plano axial en los planos sagital y coronal y además por medio de algoritmos informáticos es posible la reconstrucción en tres dimensiones (3D)⁴.

A pesar de utilizar radiaciones ionizantes, las ventajas de la TC frente a la radiografía convencional son: la mayor resolución de contraste (permite diferenciar muchas más densidades)⁵ y que la TC es una técnica tomográfica (se obtienen cortes en el plano axial, pueden reconstruirse a los planos sagital y coronal de tal forma que se evita la superposición de estructuras). El uso de contraste oral, intravenoso e incluso intracavitario aumenta la resolución de contraste y permiten la realización de estudios

vasculares (Angio-TC), muy útiles en el caso de aneurismas cerebrales y tromboembolismos pulmonares entre otros.

En el sistema musculoesquelético la TC permite una visualización más precisa y definida del sustrato óseo visualizando mejor la cortical ósea y facilitando el estudio de regiones donde la superposición de estructuras no permite un diagnóstico correcto por medio de la radiografía, por ejemplo: el cráneo, la columna vertebral, las cinturas escapular y pelviana así como otras estructuras de menor tamaño como el carpo, el tarso, etc...⁶.

La RM no utiliza radiaciones ionizantes para la obtención de la imagen, permite el estudio de cortes del espacio (axial, coronal y sagital), de forma directa, sin reconstrucción, a partir de la energía liberada por los protones de hidrógeno presentes en los tejidos tras el estímulo mediante campos magnéticos y ondas de radiofrecuencia⁷. Los átomos de hidrógeno se encuentran en su mayoría en la grasa y el agua, siendo por lo tanto especialmente sensible en el estudio de los tejidos blandos. El mayor contraste de partes blandas la hacen una prueba idónea en el estudio de músculos, tendones, ligamentos, incluso de la médula ósea, rica en grasa, no visibles con otras técnicas. Se utiliza frecuentemente en el campo de la oncología permitiendo el estudio de tumores de partes blandas como los sarcomas, donde es especialmente útil en el estudio de la extensión local y en la relación de la lesión con las estructuras neurovasculares⁸. En el caso de la RM el contraste más frecuentemente empleado son los compuestos de gadolinio, que además de aumentar la resolución de contraste, permiten el estudio de estructuras vasculares y áreas con importante vascularización como zonas de inflamación y lesiones tumorales^{9,10}.

La RM es más cara, menos disponible y tiene menor sensibilidad que la TC en el estudio del hueso, presentando además la dificultad o imposibilidad para el estudio de pacientes con claustrofobia o portadores de dispositivos mecánicos o eléctricos que hacen que sea una prueba menos utilizada que las anteriores.

Gracias a los avances tecnológicos de las últimas décadas, a través un *software* externo, los archivos de imágenes obtenidos tras la realización de una RM o TC pueden someterse a técnicas de postprocesado, para la obtención de imágenes en cualquiera de los planos del espacio, incluso combinaciones de los mismos, y para la elaboración de imágenes en tres dimensiones.

Uno de los programas utilizados se trata del *3D Slicer*, *software* de acceso libre y gratuito que permite el postprocesado de las imágenes a través de archivos DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine).

El formato DICOM se trata de un protocolo informático que permite la integración en la red de imágenes médicas en conjunto con los datos que se relacionan con ellas como los datos de un paciente o su número de historia. Permite la comunicación entre diferentes equipos informáticos y la visualización de dichas imágenes y sus datos correspondientes a través de la conexión con la red en la que se almacenan¹¹.

El *3D Slicer* admite *softwares* complementarios denominados extensiones, los cuales mejoran la experiencia de uso y su funcionalidad. Las extensiones son descargadas directamente a través del propio programa, de esta forma se agregan características nuevas al *3D Slicer* ampliando la disponibilidad de herramientas y funciones para la segmentación y reconstrucción 3D entre otras cosas. Estos archivos, expanden la utilidad del *3D Slicer*, siendo en muchos casos programados por los propios usuarios mediante lenguaje Python para estudios concretos.

Numerosas publicaciones y autores mencionan el uso del *3D Slicer* para la realización de reconstrucciones tridimensionales de los pacientes, lo que facilita su estudio morfológico. Este *software* se ha investigado en áreas como el estudio de malformaciones y la delimitación volumétrica de tumores para su posterior tratamiento. Ha demostrado ser de gran ayuda e incluso superar a métodos más convencionales, mostrando alta concordancia con las mediciones manuales de los tumores^{12,13}. En el ámbito quirúrgico este software puede ser también de gran utilidad, gracias a él se pueden realizar, mediante una impresión 3D; guías que facilitan en gran medida diferentes cirugías, como es el caso de la Neurocirugía¹⁴. La disponibilidad de modelos óseos del paciente con sus medidas anatómicas podría suponer también un logro en el campo de la Traumatología y la Ortopedia, posibilitando un estudio más exacto del paciente y la elaboración de elementos ortopédicos personalizados a medida, que supongan una mejora en la calidad de vida¹⁵.

Justificación

Este trabajo tiene como finalidad analizar el uso del *software* de acceso libre *3D Slicer* valorando la posibilidad de utilizarlo con fines didácticos y clínicos en el estudio de

imágenes radiológicas. Para ello, se compara con los programas utilizados en las estaciones de trabajo del Hospital Universitario de Salamanca para ver si es posible la utilización de un programa más económico y con funciones semejantes a los programas utilizados hasta ahora.

Objetivos

Tratamos de realizar una descripción radiológica detallada y pormenorizada de la anatomía del sistema musculoesquelético de la articulación de la rodilla utilizando *3D Slicer*, comprobando hasta dónde el postprocesado de imágenes médicas por medio de este *software* de acceso libre permite la correcta descripción anatómica y la interpretación de dichas imágenes, pudiendo tener una posible utilidad clínica o didáctica.

Material y métodos

Previamente se realizó un estudio radiológico de la articulación de la rodilla a partir de imágenes obtenidas mediante *Toshiba Vitrea FX* y *AW Server GE HealthCare*, plataformas radiológicas de pago utilizadas en el Hospital Universitario de Salamanca ([Anexo 1](#)).

Posteriormente, se realizaron dos reconstrucciones 3D de la articulación de la rodilla mediante el *software 3D Slicer*, una se realizó con una TC de un paciente con artrosis y la otra a partir de una RM de la rodilla de un paciente sano, teniendo en cuenta las diferencias entre la TC y la RM y factores propios de los pacientes como la edad o patologías concomitantes. A pesar de haber elaborado reconstrucciones 3D a partir de dos pruebas de imagen diferentes, para la descripción anatómica se utilizó únicamente la obtenida a partir de la RM por su mayor resolución de contraste y mayor posibilidad de segmentación y representación de las partes blandas.

Es relevante conocer el *3D Slicer* se utilizó sin ninguna extensión que facilitase la segmentación ni modificase la calidad de las reconstrucciones 3D, de esta forma se pudo comprobar las capacidades de dicho *software* a la hora de segmentar el sistema musculoesquelético de la rodilla.

El proceso de segmentación a través de *3D Slicer* se lleva a cabo de manera manual, segmentando de uno en uno los elementos de la articulación de la rodilla que se quieren

representar para asegurar una reconstrucción en tres dimensiones lo más realista posible. Para ello, se define con la herramienta de “*pincel*” el elemento que se quiere segmentar, pintando y delimitando en los diferentes cortes y planos de la prueba de imagen dicho elemento. Posteriormente, el *software* mediante la herramienta “*Grow from seeds*” analizará cada uno de los cortes, determinando en ellos el elemento pintado y definido y creando a partir de los datos obtenidos una representación 3D del elemento segmentado (Figura 1).

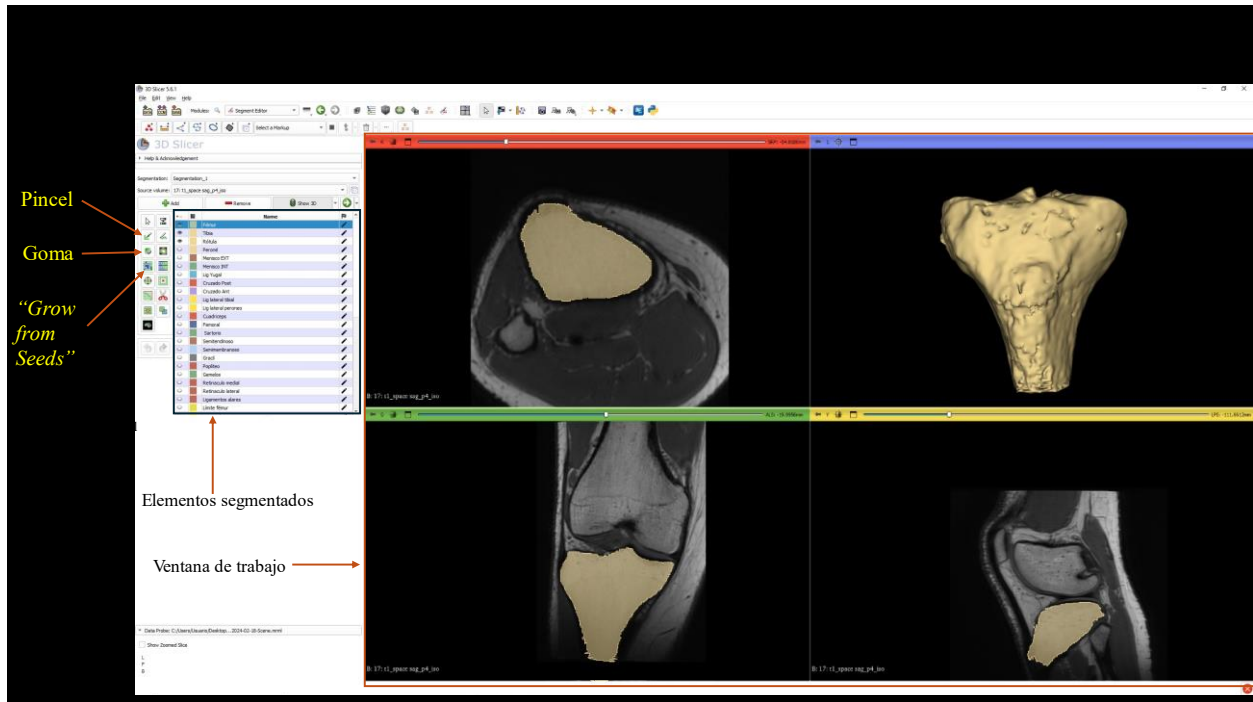


Figura 1. Interfaz del *3D Slicer*. Principales herramientas utilizadas. Cortes en los planos axial, coronal y sagital de una RM de rodilla donde se han pintado las intensidades correspondientes a la tibia para su posterior reconstrucción tridimensional. En el proceso de segmentación se delimita la tibia en el mayor número de cortes posibles en los diferentes planos para que la reconstrucción sea lo más precisa posible.

Es importante tener en cuenta que el *3D Slicer* interpreta las diferentes densidades (en la TC) o intensidades (en la RM) de cada corte para la realizar la reconstrucción, de tal forma que, si hay regiones próximas a lo que se ha pintado con una intensidad muy semejante, el *software* interpretará que esa región también forma parte del elemento que se quiere segmentar. Por ello, cuanto mejor se delimite el elemento a segmentar, pintándolo en el mayor número de cortes posible en los diferentes planos; más precisa será la reconstrucción. Es importante tener en cuenta que, tejidos fibrosos como ligamentos o tendones musculares varían su intensidad de un corte a otro en la RM conforme van cambiando la orientación de las fibras que los constituyen, haciendo más compleja su

delimitación en las diferentes imágenes tomográficas para que el *software* pueda interpretarlos y reconstruirlos en 3D.

Resultados

En primer lugar, los elementos óseos (Figura 2) se segmentaron con precisión, ya que al tratarse de una rodilla sana no se hallaron estructuras que interfirieran (al contrario que en la TC del paciente con artrosis donde se aprecian gran cantidad de osteofitos) y se representaron adecuadamente.

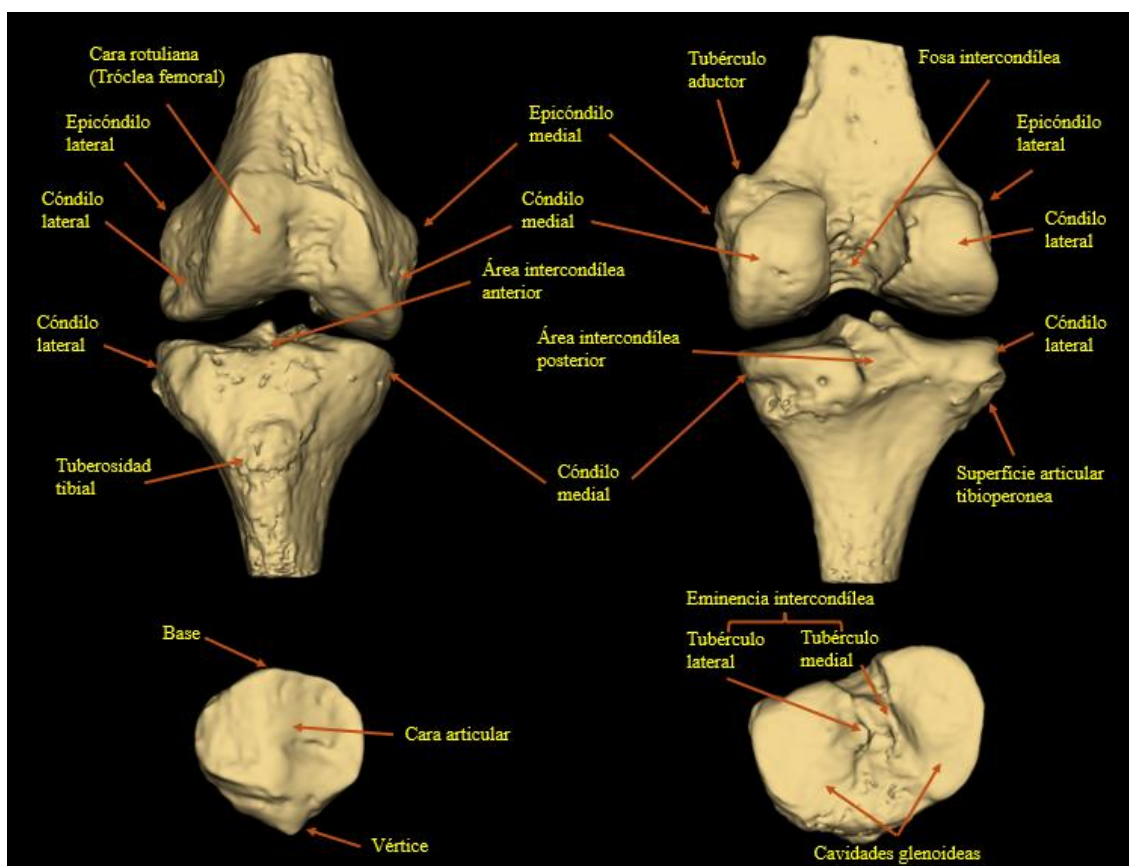


Figura 2. Reconstrucción 3D de fémur, tibia y rótula. Visión anterior y posterior de fémur y tibia. Cara posterior de la rótula. Cara superior de la tibia o meseta tibial.

La reconstrucción 3D de la epífisis distal del fémur permite distinguir los cóndilos femorales separados por la tróclea femoral, que se continúa con la escotadura intercondílea. Las carillas articulares se distinguen correctamente permitiendo ver donde articula con la rótula (en la cual también se distinguen sus dos carillas articulares) y con la tibia. Por el contrario, las cavidades glenoideas de la tibia, aunque se distinguen no

han sido definidas con tanta precisión mostrándose en la reconstrucción con unas superficies más planas de la que realmente presentan (Figura 2).

La superficie del fémur y de la tibia presentan regiones más accidentadas y con numerosas irregularidades que realmente no poseen, esto es debido a los motivos expuestos anteriormente. A pesar de haber pintado los cortes de la RM con precisión, el *3D Slicer* no representa las estructuras con total exactitud.

La RM presenta mayor sensibilidad de las partes blandas, aun así, se requiere de gran precisión para pintar en los diferentes cortes las estructuras que queremos segmentar. Esto se debe a la proximidad y conexión que existen entre los elementos de unión que forman parte de la articulación de la rodilla y que impide que el *3D Slicer* pueda reconstruirlos adecuadamente, haciendo que la superficie de todos los elementos segmentados sea en gran medida irregular o presente discontinuidad (Figura 3).



Figura 3. Corte coronal de la rodilla. El *3D Slicer* segmentó los ligamentos cruzados (rojo y rosa) y meniscos (marrón y verde). Existen regiones que, aunque correspondan al cartílago articular y al sustrato óseo el *software* las interpreta como si formasen parte de los meniscos o de los ligamentos (debido a que en la RM presentan intensidades muy parecidas) y por eso aparecen pintadas de los colores correspondientes a dichas estructuras haciendo que la reconstrucción 3D de estos elementos sea más imprecisa e irregular.

Intensidades tan semejantes de elementos tan próximos entre sí en la RM, junto a las limitaciones que presenta el *3D Slicer* para pintar elementos de tamaño tan pequeño en los diferentes cortes, dificulta la segmentación de meniscos y ligamentos de la rodilla, lo que determina que, en el caso de los meniscos su reconstrucción tridimensional es bastante acertada y aproximada, pero no llega a ser exacta. La eminencia intercondílea de la tibia divide el espacio intercondíleo en anterior y posterior delimitando los puntos de inserción de los meniscos interno y externo y de los ligamentos cruzados (Figura 4). En el caso de los ligamentos cruzados, sus puntos de inserción en fémur y tibia y su recorrido entre ambos huesos presentan fidelidad con la imagen de la RM, no obstante, existen irregularidades y el grosor de los ligamentos no es el adecuado (Figura 5). La reconstrucción 3D nos permite entender la distribución anatómica de estos elementos en el espacio intraarticular.

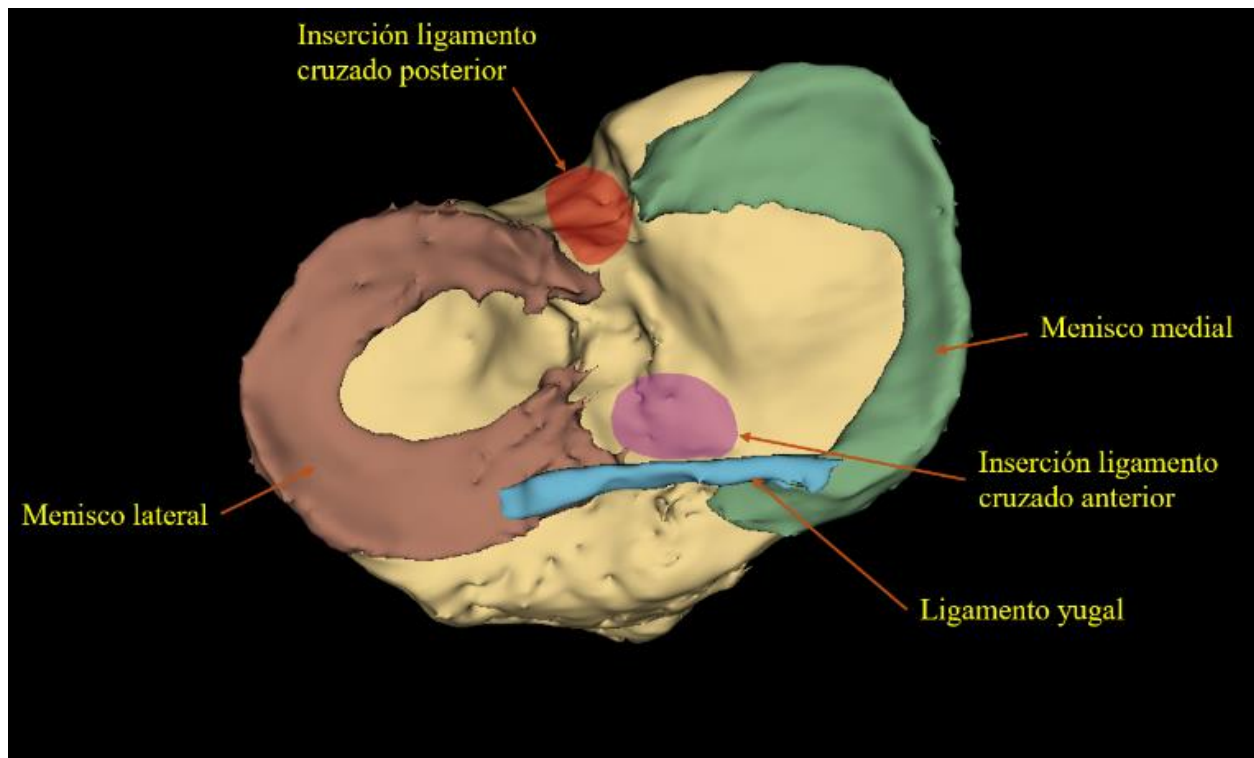


Figura 4. Visión superior de la meseta tibial. Representación de los meniscos lateral (marrón, forma de O) y medial (verde, forma de C). Las astas anteriores de los meniscos se encuentran unidas por el ligamento yugal, el cual fue reconstruido de forma manual ya que el *3D Slicer* no permite segmentar dicha estructura con las herramientas de las que dispone. Inserciones tibiales de los ligamentos cruzados.

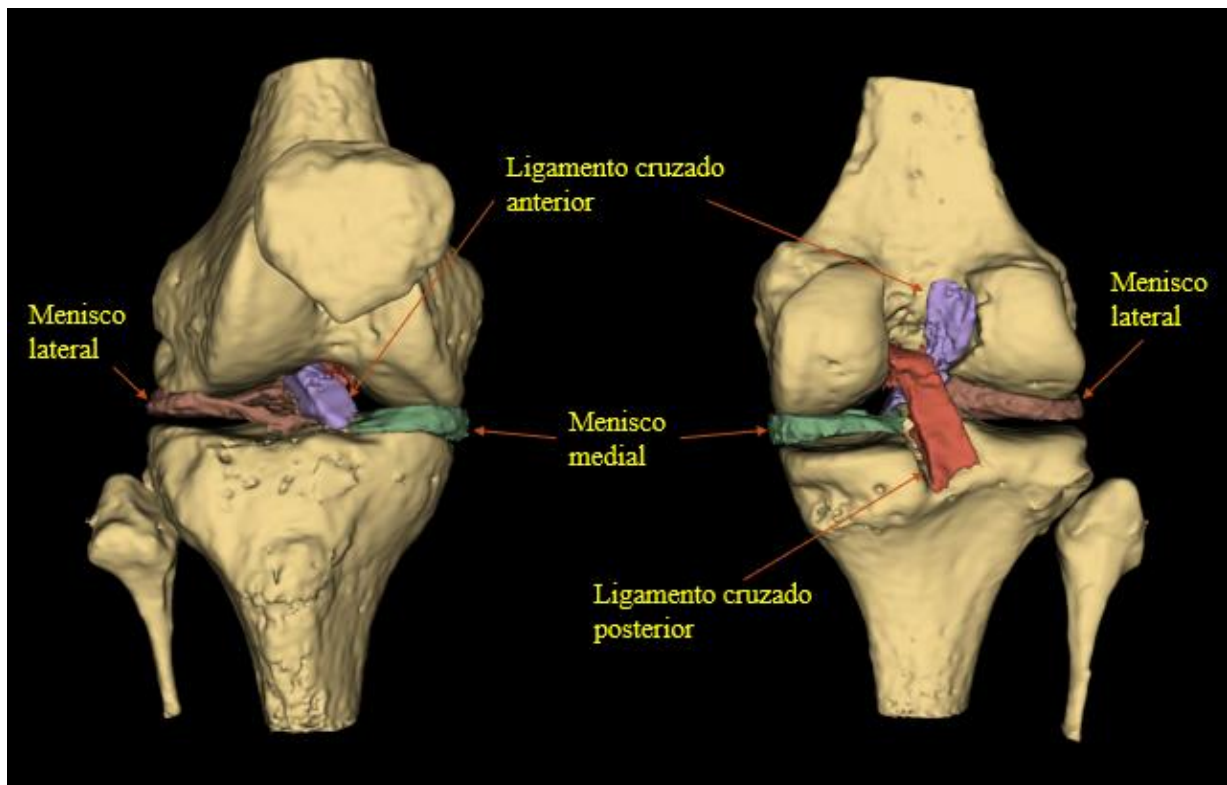


Figura 5. Ligamentos cruzados y meniscos. Visión anterior y posterior.

La región anterior de la articulación de la rodilla se encuentra representada por el ligamento rotuliano, el cual supone una continuación del tendón rotuliano del cuádriceps descendiendo desde la parte anteroinferior de la rótula para unirse con la tuberosidad anterior de la tibia. Al ser el ligamento de mayor tamaño y grosor de la rodilla, su representación en el *3D Slicer* presenta bastante concordancia con la estructura que realmente posee y que se ve en los cortes de la RM (Figura 6).

A ambos lados del ligamento rotuliano se encuentran los retináculos rotulianos, que a pesar de que el *3D Slicer* ha sido capaz de segmentarlos, la imagen tridimensional creada es insuficiente y no muestra la estructura completa. Estas expansiones salen de los vastos externo e interno permitiendo crear un esbozo anatómico de como realmente son, pero no existe una unión clara con los cóndilos tibiales, ni con la rótula, ni con el ligamento rotuliano teniendo una representación que se aleja bastante de cómo es en realidad (Figura 6).

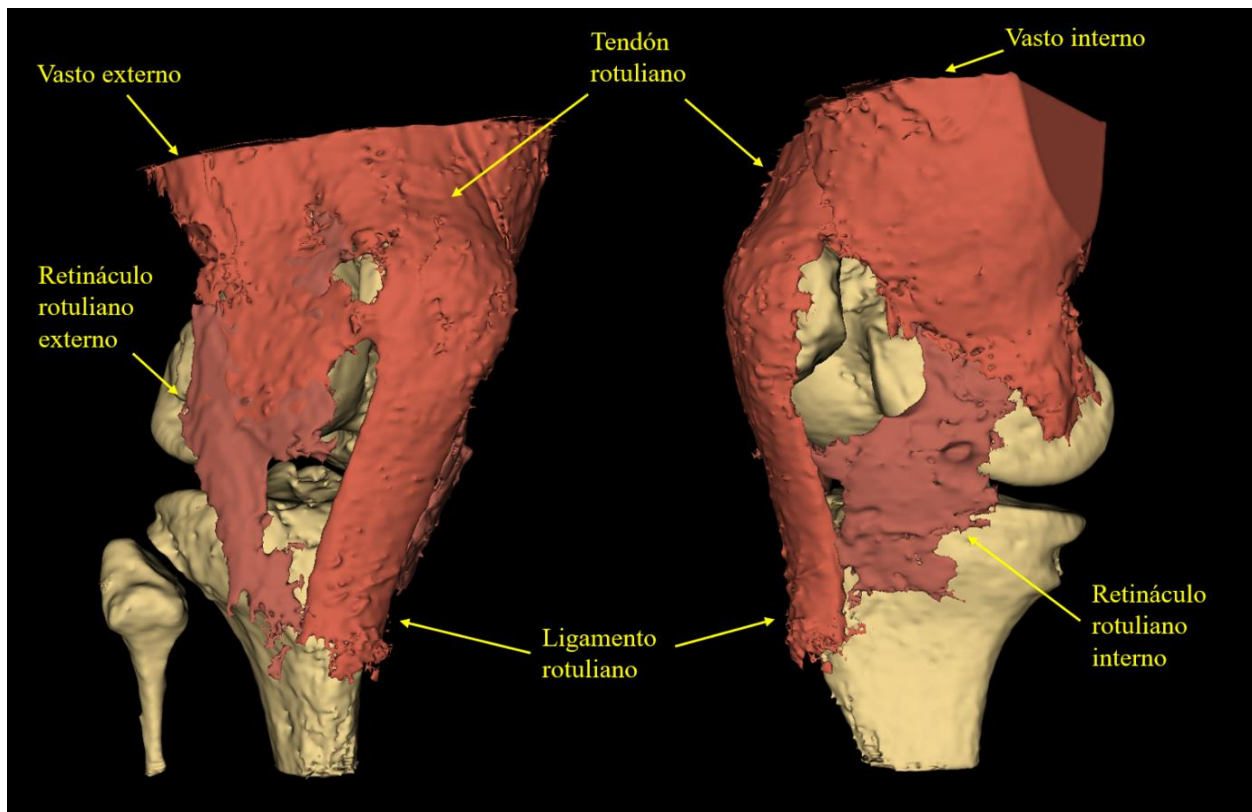


Figura 6. Reconstrucción 3D del cuádriceps. Visión anterolateral y anteromedial. La representación del ligamento rotuliano es más exacta. Los retináculos rotulianos se encuentran incompletos y no cubren adecuadamente la articulación de la rodilla.

En cuanto los ligamentos colaterales y los ligamentos rotulianos alares (Figura 7), debido a su proximidad con la capsula articular (al igual que sucede con los retináculos rotulianos), el *3D Slicer* los representa de forma mucho más inexacta y presentan un mayor grosor del que realmente poseen. Aunque su recorrido sea semejante al que presentan en la RM, sus inserciones al hueso son imprecisas y no están correctamente definidas. Permiten tener un concepto de su estructura, pero no presentan tanta fidelidad con la imagen real como los elementos óseos o el ligamento rotuliano.

El ligamento colateral tibial está adecuadamente relacionado con el menisco interno, pero no se distingue el plano superficial del profundo. Presenta una inserción inferior que no desciende lo suficiente por el cóndilo lateral tibial hasta la superficie lateral de la tibia siendo más corto en la representación de lo que realmente es. El ligamento colateral peroneo debería ser independiente del menisco externo estando estos separados por la capsula articular y la inserción superior del músculo poplíteo.

Los ligamentos rotulianos alares son también muy irregulares y presentan numerosas discontinuidades y oquedades tanto en su trayecto como en sus inserciones, no uniéndose adecuadamente al reborde rotuliano ni a los epicóndilos femorales. Su mayor anchura, por otra parte, hace que en la reconstrucción 3D presenten una inserción en la rótula superior a la que sería la correcta.

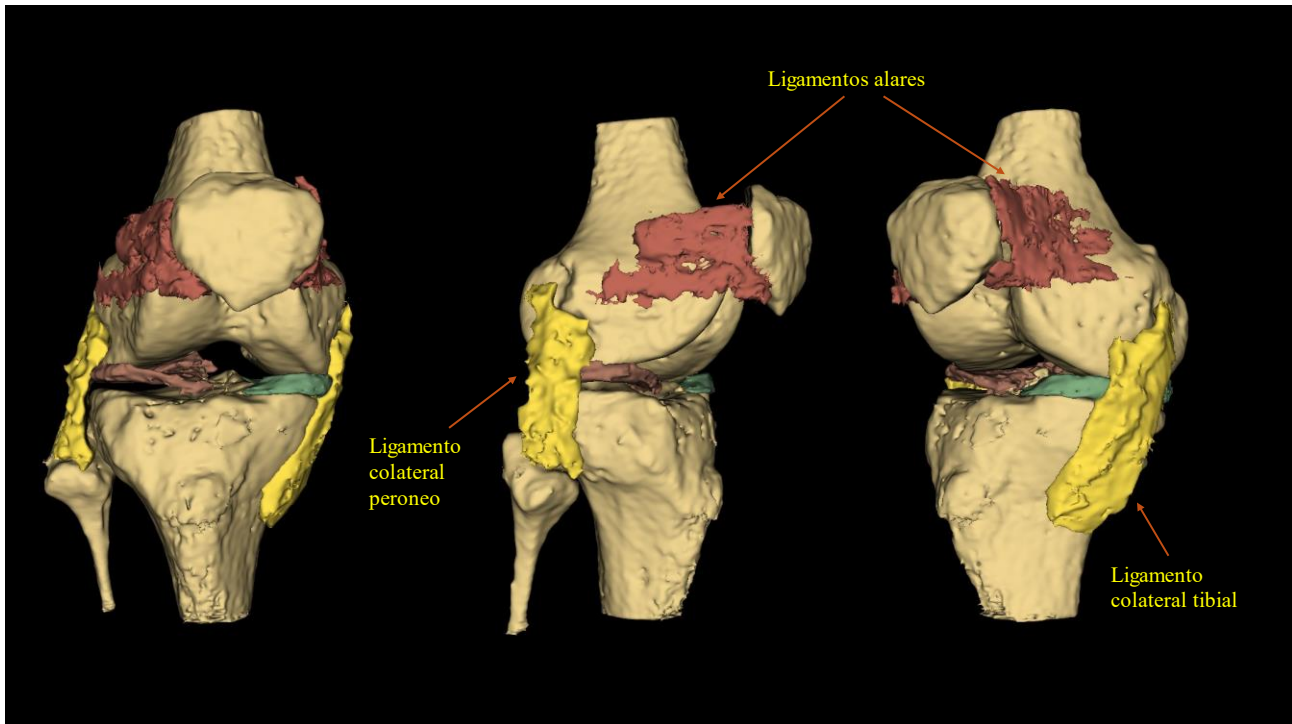


Figura 7. Reconstrucción de los ligamentos colaterales y rotulianos alares. Visiones anterior, lateral y anteromedial. Se aprecia como las inserciones y el recorrido de los ligamentos alares no son continuas y no se unen correctamente con el hueso.

El ligamento poplíteo oblicuo y el ligamento poplíteo arqueado no han podido ser representados en 3D mediante este *software*, esto se debe a las numerosas estructuras de carácter fibroso que se encuentran superpuestas en el hueco poplíteo y que en la RM presentan las mismas intensidades. Los planos posteriores de la capsula articular se ven reforzados por estos ligamentos y sobre ellos se superponen las fascias musculares de los músculos que recorren posteriormente la articulación de la rodilla como son la del músculo poplíteo o la del gastrocnemio.

Por esta misma razón, la cápsula articular y la membrana sinovial tampoco pueden ser expuestas en 3D, su estrecha relación con el resto de los medios de unión de la articulación de la rodilla y su reducido grosor impide que sean delimitadas manualmente para que el *3D Slicer* pueda segmentarlas en 3D.

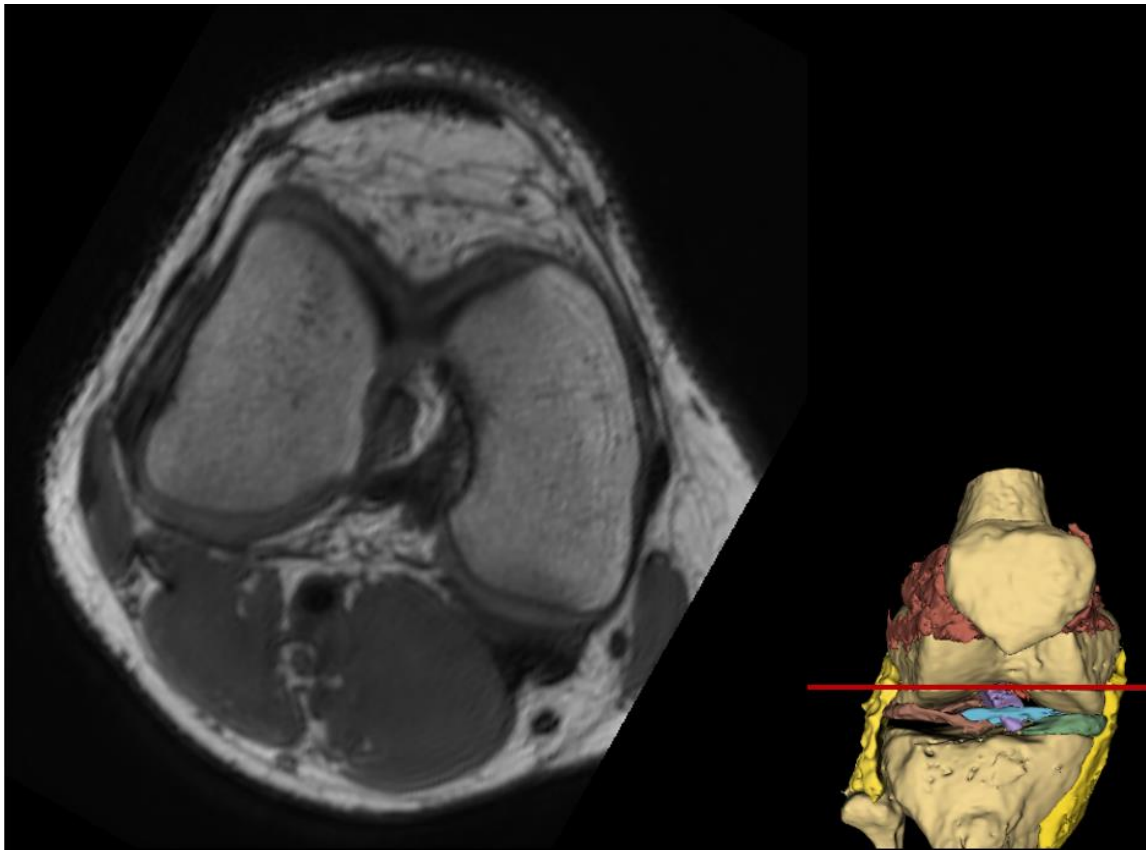


Figura 8. Corte de la rodilla en plano axial. El *3D Slicer* no discierne entre estructuras tan próximas entre sí y con una composición similar, sin embargo, en las imágenes de la RM, aunque exista una intensidad parecida entre los elementos de unión que constituyen la articulación de la rodilla y estén tan próximos entre sí, se pueden diferenciar unos de otros.

A diferencia de los medios de unión de la rodilla, el *3D Slicer* reconstruye con mayor precisión el trayecto y la anatomía de los músculos tras pintarlos en los diferentes cortes de la RM. Esto se debe a su mayor tamaño y la separación entre estos, que combinado con la sensibilidad de la RM para interpretarlos simplifica en gran medida su segmentación. No obstante, aunque el recorrido muscular en 3D concuerda con la RM existen complicaciones a la hora de definir los tendones de dichos músculos y su recorrido por la articulación debido a que son elementos fibrosos y más pequeños. El *software* tampoco permite delimitar hasta donde llegan los tendones, no pudiendo distinguirlos de la porción de cada músculo formada únicamente por fibras musculares.

El cuádriceps fue el primer músculo segmentado, acercándose en gran medida a su anatomía real, aunque no se pudieron segmentar por separado los vastos que lo constituyen. Se puede intuir el territorio de cada uno de ellos, pero la falta de texturas en las reconstrucciones a partir del *3D Slicer* impide la correcta distinción de los vientres musculares que componen el cuádriceps. Esto supuso una limitación a la hora de describir

el recto femoral, del que se ha segmentado su porción tendinosa final para la reconstrucción 3D. Únicamente se puede saber que solo se ha segmentado el tendón del recto femoral revisando la RM que se ha utilizado para la reconstrucción 3D, la cual tampoco engloba su porción muscular. El tendón del recto femoral desciende hasta formar parte del tendón rotuliano, el cual en la representación 3D se inserta en la rótula y continúa descendiendo para formar el ligamento rotuliano (Figura 6).

Continuando con los músculos posteriores del muslo, el bíceps femoral conserva una estructura y orientación clara y definida descendiendo posterior y lateral a la tibia, el tendón del bíceps femoral se inserta en la parte posterolateral de la cabeza del peroné conservando su morfología aplanada (Figura 9).

Es relevante tener en cuenta que la RM con la se está trabajando únicamente focaliza la articulación de la rodilla y solo se ha segmentado la porción terminal del bíceps femoral no pudiéndose distinguir en este tramo las dos cabezas musculares que lo forman.

No hay que olvidar que todos los elementos representados mediante este *software* son susceptibles de presentar irregularidades que no concuerdan con los cortes de la RM a partir de los que son generados, tanto el reborde del bíceps femoral como el plano superficial presentan depresiones e irregularidades que no deberían darse, al igual que sucede con el resto de las estructuras anatómicas.

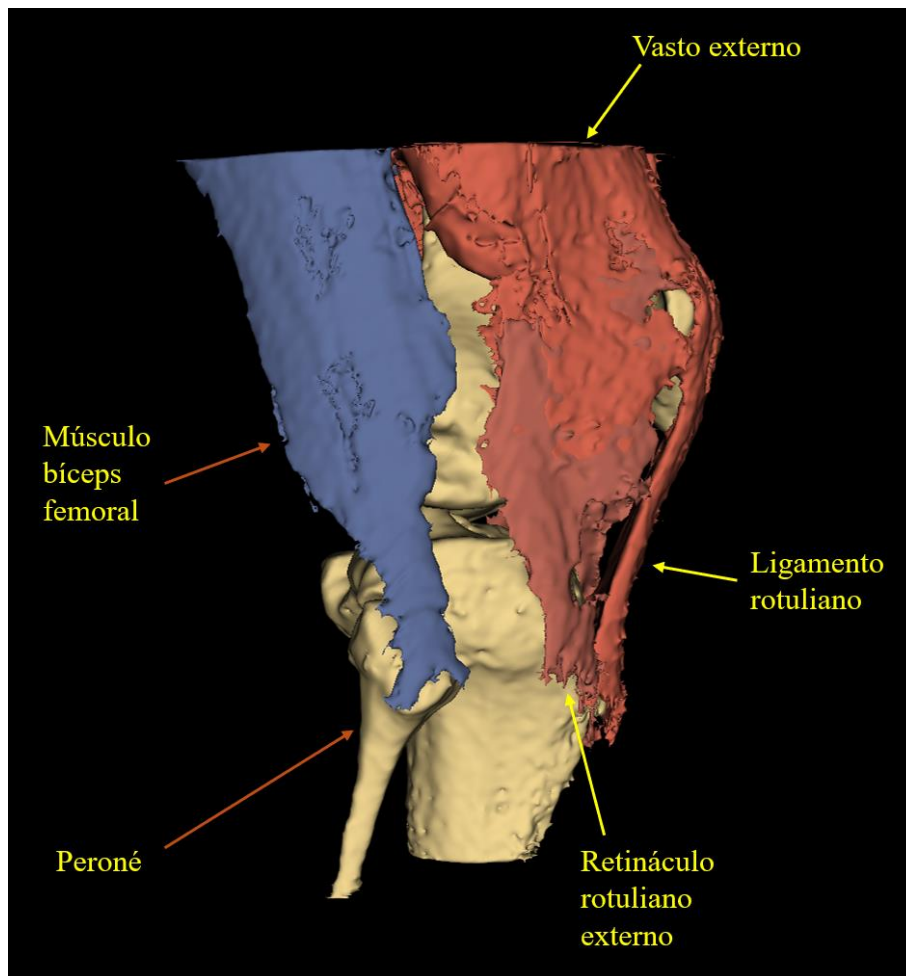


Figura 9. Visión lateral de la rodilla. Inserción del bíceps femoral.

El músculo semimembranoso presenta una superficie muy irregular, de tal forma que parece solaparse con el semitendinoso llegando a distinguirse únicamente por la diferencia de color establecida en la reconstrucción 3D para cada elemento de la articulación de la rodilla (Figura 10).

El tendón terminal del semimembranoso se encuentra insertado en la parte posterior el cóndilo medial de la tibia, no pudiéndose representar sus expansiones fibrosas por el *3D Slicer* debido a los motivos expuestos anteriormente.

El músculo semitendinoso desciende posterior al semimembranoso hasta llegar a la parte posterior del cóndilo medial de la tibia, que su porción tendinosa bordea para insertarse en la cara medial de la tibia formando el plano profundo de la pata de ganso.

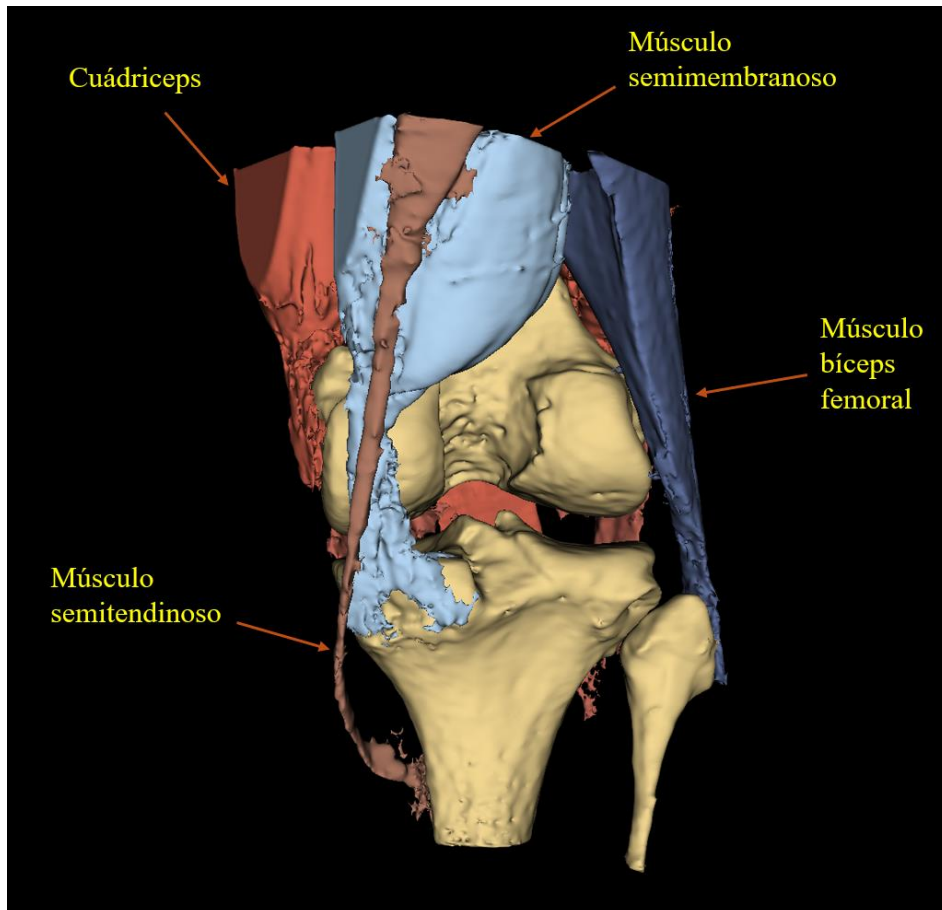


Figura 10. Visión posterior de la articulación de la rodilla. En la reconstrucción 3D el semitendinoso y el semimembranoso se distinguen en su porción proximal gracias a la posibilidad que ofrece el *3D Slicer* para asignar un color a cada elemento segmentado. Estos músculos descienden juntos por la parte posterior y medial del muslo hasta llegar al cóndilo medial donde se separan.

La pata de ganso está formada por la inserción común del semitendinoso, el sartorio y el grácil en la cara medial de la tibia. Se puede ver como en un plano más profundo de la pata de ganso se encuentra el semitendinoso, recubierto por el grácil y por el sartorio, siendo este último el tendón más superficial (Figura 11).

Estos tres músculos se distinguieron bien en la segmentación generando una reconstrucción 3D que concuerda bastante con la RM, en este caso la diferencia de colores establecida únicamente facilita la comprensión de su anatomía y recorrido. Sin embargo, estos músculos son de menor grosor y tamaño y pintarlos en los cortes de la RM y su posterior segmentación fue complejo. Aunque la representación en 3D coincide con la anatomía que realmente tienen estos músculos, la reconstrucción que realizó el *3D Slicer* presenta gran cantidad de segmentos irregulares. La principal limitación durante la segmentación de los músculos que constituyen la pata de ganso fue a la hora de segmentar

el grácil, ya que la RM, al englobar solamente la rodilla; únicamente abarca su porción tendinosa, que al ser de un grosor tan reducido (a diferencia del tendón del recto femoral), su delimitación en los cortes de la RM para su posterior segmentación resultó más compleja e imprecisa en comparación con el sartorio y el semitendinoso.

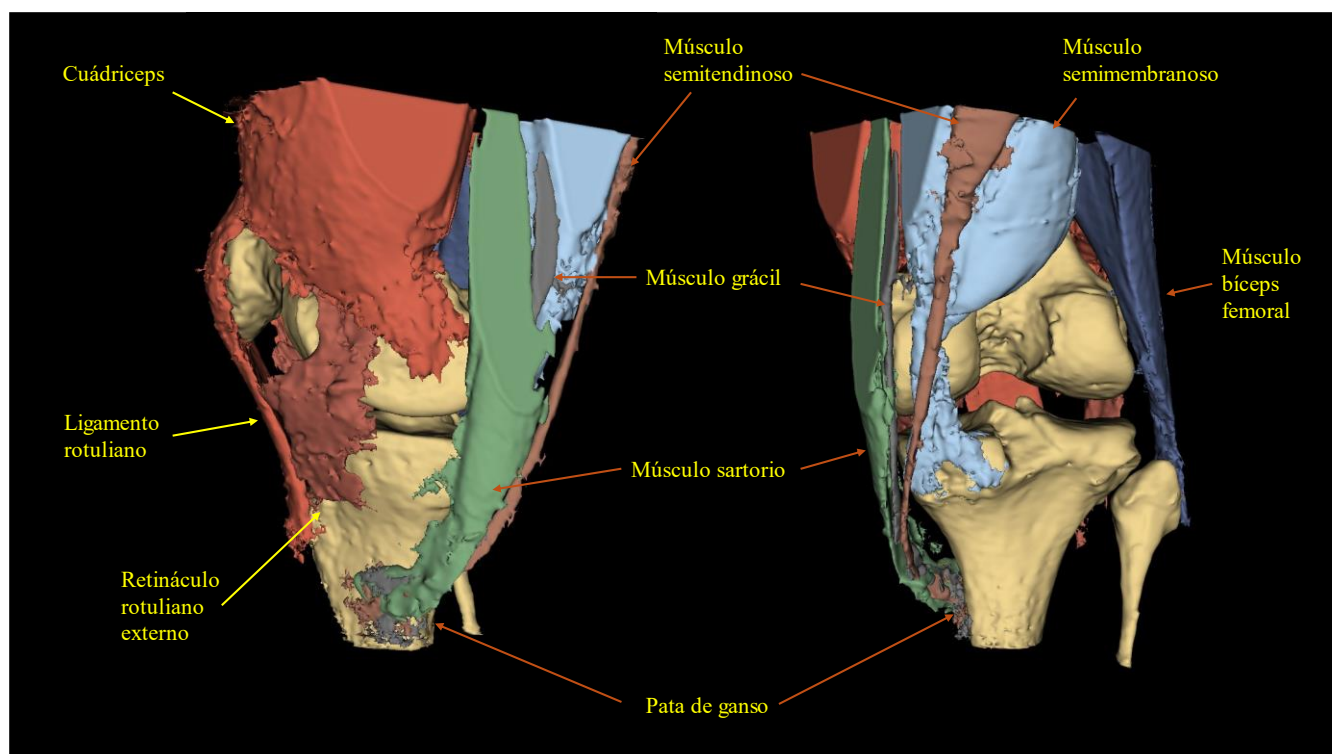


Figura 11. Visión posterior y medial del muslo. Recorrido de los músculos de la pata de ganso. La parte superior del sartorio y del grácil, junto con la del cuádriceps y la del semimembranoso aparecen aplanadas, ya que coinciden con el límite de los cortes de la RM con la que se está trabajando.

Respecto a los músculos de la pierna, solo se segmentaron el músculo poplíteo y el gastrocnemio, el músculo delgado plantar no fue reconstruido en 3D, ya que su participación en la flexo-extensión y rotación de la rodilla es inexistente.

La reconstrucción que el *3D Slicer* hace del músculo poplíteo permite conocer su recorrido y sus inserciones en el cóndilo lateral del fémur y la cara posterior de la tibia (Figura 12). A la hora de segmentarlo, se delimita correctamente en los diferentes cortes de la RM, pero el *3D Slicer* no lo distingue adecuadamente del resto de elementos adyacentes, por lo que su aspecto en 3D no presenta parecido alguno con la realidad.

Sobre la inserción del músculo poplíteo en el cóndilo femoral se debería situar el ligamento colateral peroneo, no obstante, la reconstrucción 3D tan abrupta de este ligamento hace que ambos elementos parezcan uno solo cuando se muestran juntos, la diferencia de color con la que se representan cada uno facilita su distinción (Figura 12).

Por otro lado, la imposibilidad de segmentar el ligamento arqueado en el *3D Slicer* impide conocer cómo se relaciona con este músculo.

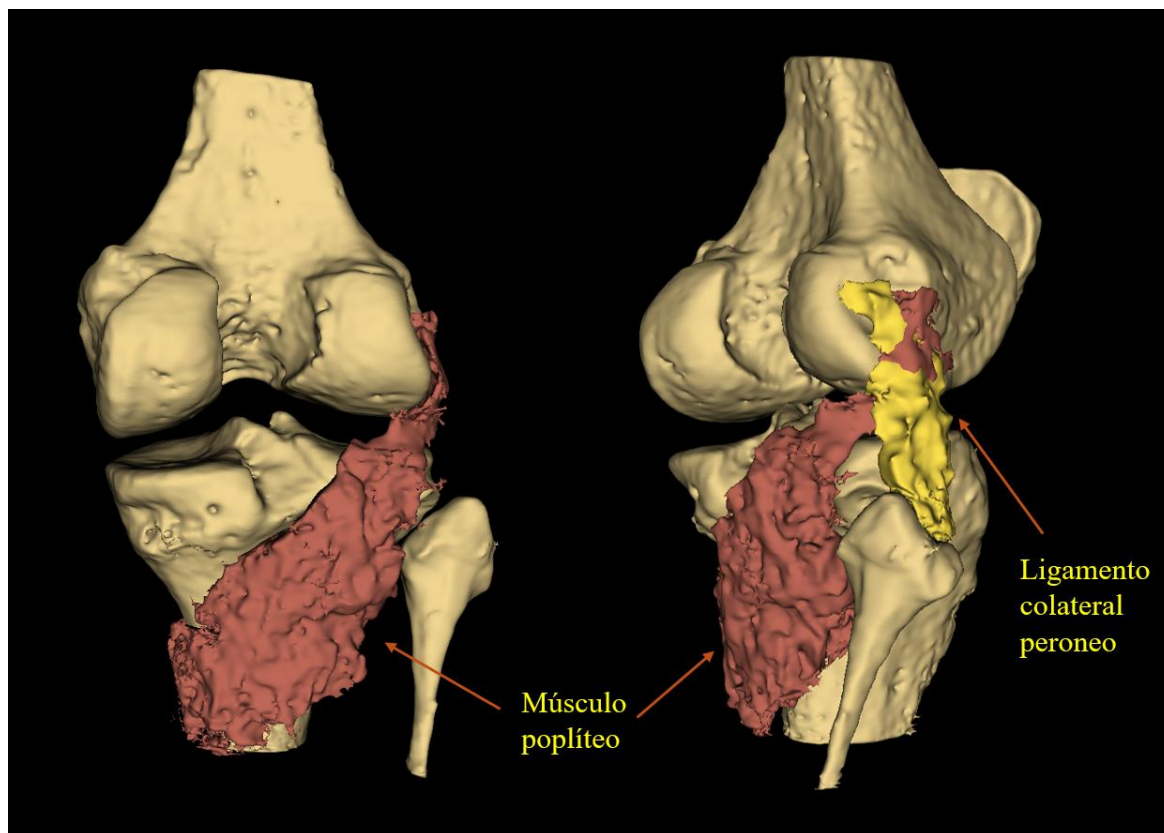


Figura 12. Visión posterior y posterolateral en 3D de la articulación de la rodilla. Se muestra el músculo poplíteo en relación con el sustrato óseo de la extremidad inferior. En la visión posterolateral se muestra la relación entre el músculo poplíteo y el ligamento colateral peroneo en la reconstrucción hecha mediante *3D Slicer*. Ambos elementos se solapan entre sí y solo se distinguen por la diferencia de color existente entre ellos.

El músculo gastrocnemio se encuentra recubriendo al músculo poplíteo en un plano más superficial, está constituido por una cabeza medial y otra lateral, las cuales no se distinguen en la reconstrucción 3D pareciendo un único fascículo de superficie bastante irregular (Figura 13). Ambas cabezas musculares se diferencian en su parte superior donde se separan para insertarse cada una en un epicóndilo femoral formando los bordes inferomedial e inferolateral del hueco poplíteo.

En la parte posterior de la articulación de la rodilla se encuentra el hueco poplíteo perfectamente definido en la reconstrucción en 3D, está delimitado por la parte inferior por el gastrocnemio, por la parte superior y lateral por el bíceps femoral y por la parte superior y medial por el semimembranoso (Figura 14).

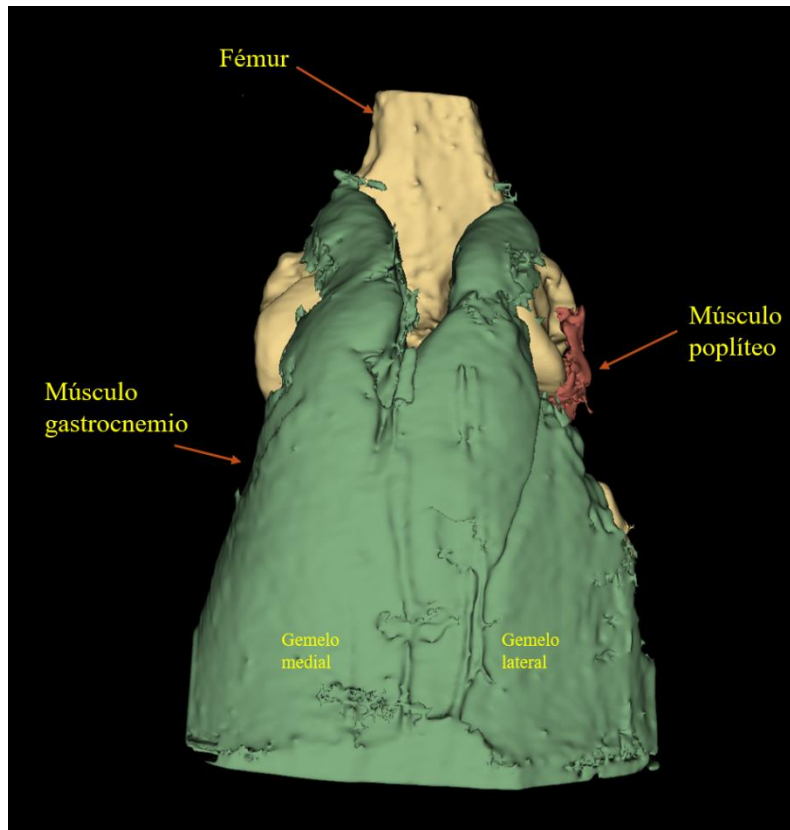


Figura 13. Visión posterior de la pierna en 3D. Se ha representado el músculo gastrocnemio sobre el poplíteo.

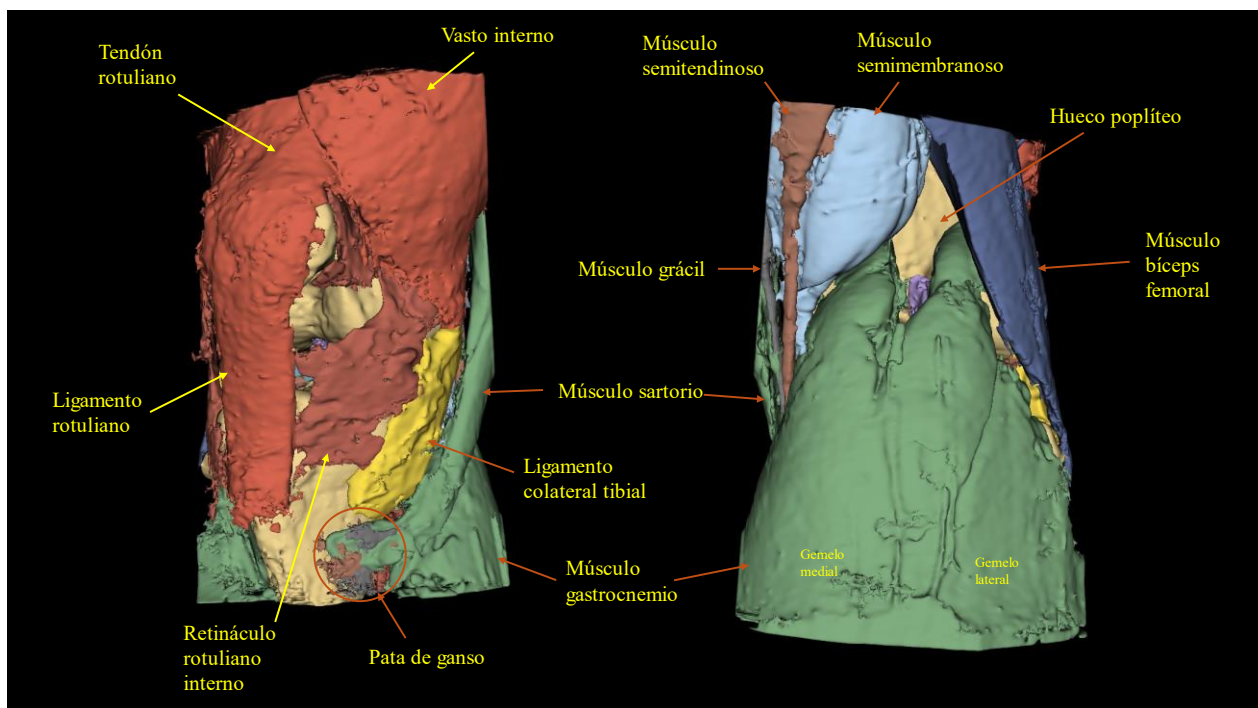


Figura 14. Reconstrucción final de la rodilla hecha mediante *3D Slicer* en la que se muestran todos los elementos segmentados. Visión anterior y posterior.

Una vez descritos y segmentados todos los elementos de la rodilla gracias al *3D Slicer* se obtiene una representación tridimensional de dicha articulación que, a pesar de ser muy semejante a la mostrada en la RM; presenta numerosas irregularidades e inexactitudes que la alejan de mostrar una anatomía exacta de como realmente es la rodilla y los elementos que la constituyen.

Discusión

Es relevante tener en cuenta que el *3D Slicer* es un programa gratuito que, a pesar de tener numerosas ventajas (como el uso de extensiones para ampliar su funcionalidad o la posibilidad de realizar impresiones en 3D), no permite una descripción anatómica tan detallada ni unas reconstrucciones en 3D tan realistas como los *softwares* utilizados en las estaciones de trabajo del Complejo Hospitalario, los cuales son de pago ([Anexo 1](#)).

La primera representación 3D realizada con este *software* para este trabajo fue a partir de una imagen de TC de la articulación de la rodilla de un paciente con artrosis (Figura 15). Durante el proceso de segmentado y reconstrucción del sustrato óseo hubo grandes dificultades ya que en la imagen se apreciaban signos propios de la artrosis (osteofitos, geodas, esclerosis subcondral, reducción del espacio articular)¹⁰, lo que provocó que por mucha precisión con la que se delimitasen los huesos en los diferentes cortes, cuando el *software* los representaba en 3D se mostraban distorsionados e incluso se fusionaban en algunos puntos.

El *3D Slicer* interpretaba las regiones más afectadas por la artrosis como un único elemento debido a sus densidades idénticas y su proximidad. Elementos como el fémur y la tibia debido a la reducción del espacio articular propia de la artrosis estaban muy próximos entre sí y, a pesar de ser elementos diferentes; el *software* no los distinguía de forma correcta, segmentándolos como un solo elemento.

Ante este problema se utilizó la herramienta de suavizado del *3D Slicer* (“*smoothing*”) que nos permitió eliminar de forma manual gran parte de las imperfecciones, no obstante; esta herramienta, aunque útil, no nos permite alcanzar el grado de realismo que se quiere conseguir, llegando en algunos casos a perder detalles anatómicos relevantes e impidiendo la correcta descripción anatómica de los elementos óseos (Figura 16).



Figura 15. Cortes axial, sagital y coronal del TC de un paciente con artrosis. A pesar de que el TC es la prueba de imagen idónea para representar el sustrato óseo, la reconstrucción de este en *3D Slicer* se ve en gran medida dificultada por la artrosis que el paciente presentaba.

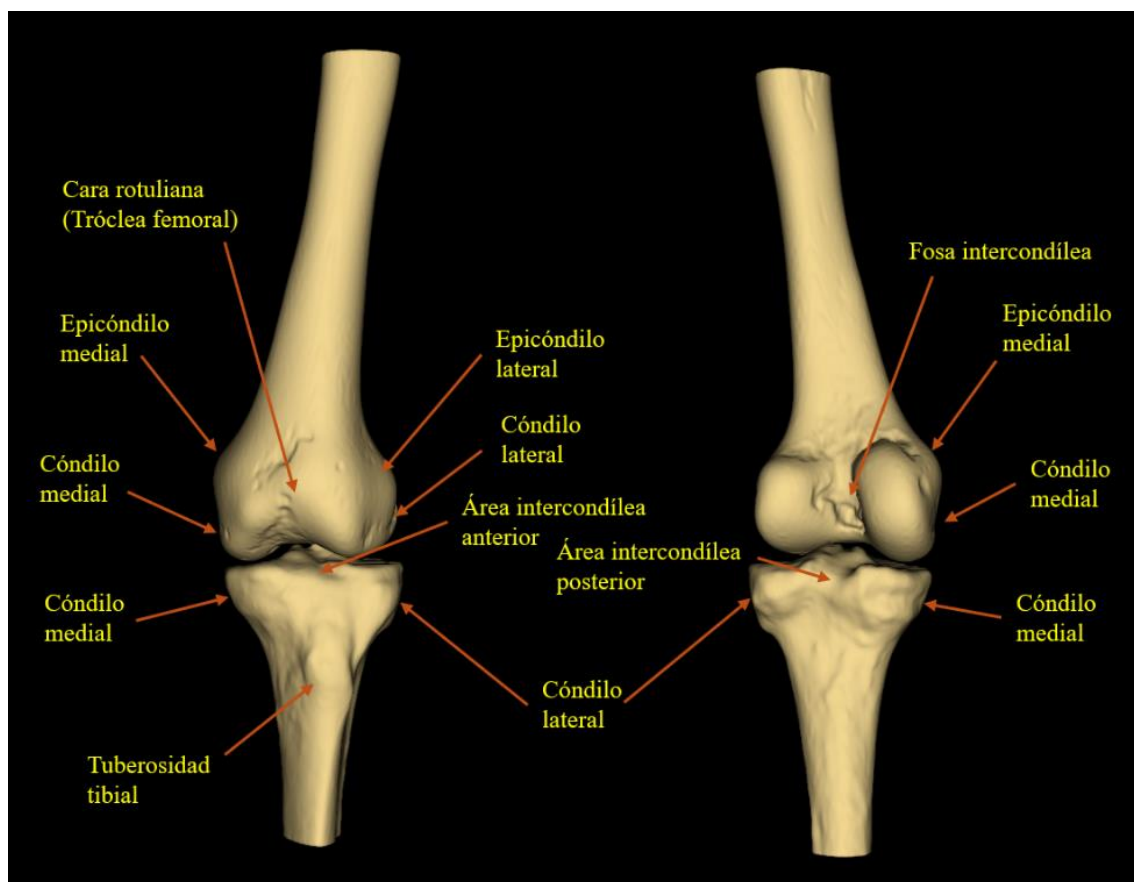


Figura 16. Representación 3D de fémur y tibia. Visión anterior y posterior. La superficie ósea es mucho mas lisa y redondeada lo que hace que se aleje de la realidad anatómica. Detalles anatómicos como el tubérculo aductor, la superficie articular tibioperonea o las carillas articulares del fémur son inexistentes.

Otro inconveniente durante la reconstrucción 3D fue al segmentar las partes blandas, como es el caso de meniscos y ligamentos; cuyo estudio mediante TC resulta complejo, no pudiéndose segmentar. Las estructuras musculares tampoco se distinguen adecuadamente, esto hace que delimitar los elementos a segmentar, pintándolos en los diferentes cortes; sea más complejo y que el *3D Slicer* no pueda proporcionar una reconstrucción 3D fiel y acorde a las imágenes TC de la que se obtiene.

La falta de realismo obtenido en la representación 3D a partir de la TC llevó a la realización de otra reconstrucción 3D, esta vez a partir de una RM de la rodilla de un paciente sano (Figura 17).

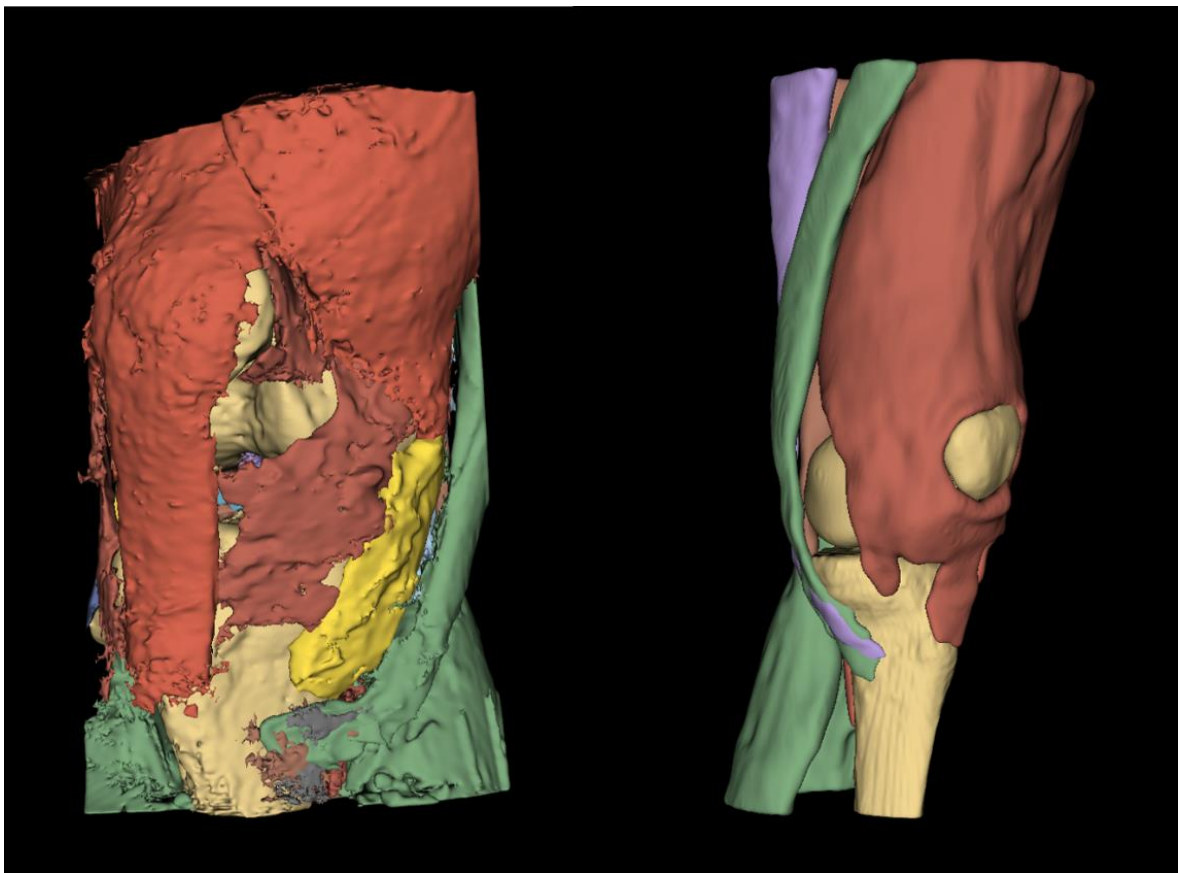


Figura 17. Reconstrucciones 3D hechas mediante *3D Slicer* a partir de una RM (izquierda) y de una TC (derecha). La reconstrucción de la RM presenta más grado de realismo y fidelidad respecto a la anatomía de la rodilla. En la reconstrucción hecha a partir de la TC solo se pudieron segmentar el sustrato óseo y los músculos con gran falta de realismo. Esta comparación recalca la importancia de utilizar la prueba de imagen adecuada.

Al trabajar con la RM, no se pudieron segmentar algunos elementos (el ligamento poplíteo arqueado, la cápsula articular, etc...), pero los meniscos y gran parte de los ligamentos se segmentaron y representaron adecuadamente obteniendo una imagen 3D mucho más adecuada al objetivo de este trabajo.

A pesar, de las dificultades y limitaciones mencionadas en los resultados, la RM fue la prueba de imagen más adecuada para representar en 3D el sistema musculoesquelético de la rodilla. También debemos tener en cuenta que la RM correspondía a un paciente sano, por lo que no se apreció ninguna alteración morfológica que limitase la segmentación de la rodilla.

El elemento anatómico que se va a segmentar, las patologías percibidas en la prueba de imagen y que dicha prueba de imagen sea la adecuada para la reconstrucción en 3D resultan factores importantes que hay que tener en cuenta a la hora de utilizar el *3D Slicer* para obtener una reconstrucción 3D realista y que permita describir correctamente los elementos representados.

Aunque el proceso de segmentado con este *software* sea semiautomático, es en gran medida operador dependiente. No hay que olvidar que hay que seleccionar el elemento a segmentar de manera manual en los cortes del archivo DICOM para que el programa pueda representarlo en 3D, por lo tanto, el grado de realismo y detalle de las reconstrucciones 3D está enormemente influenciado por la experiencia y la capacidad del operador para interpretar imágenes médicas, siendo entonces mucho más precisa la selección del elemento a segmentar. Existen extensiones y algoritmos externos¹⁶ que mejoran la capacidad de segmentación para conseguir un mejor modelo 3D, no obstante, para este trabajo se utilizó *3D Slicer* sin funciones externas, ya que la utilización de estas impide al operador valorar las posibilidades y limitaciones del programa.

Por otro lado; la necesidad de pintar el mayor número de cortes en los diferentes planos para que el *3D Slicer* realice una reconstrucción lo más realista posible, junto con la imposibilidad de poder segmentar todos los elementos a la vez hace que el proceso de obtención de imágenes 3D lleve un elevado número de horas, no obstante, en un artículo donde se comparan diferentes *softwares* de reconstrucción 3D, el programa *3D Slicer* presenta los mejores tiempos de segmentación¹².

Es cierto que el tiempo de segmentación y la calidad de la reconstrucción 3D dependen del elemento anatómico que se quiera modelar, ya que este programa se utiliza en la segmentación de otras regiones anatómicas^{14,16}, sin embargo; el número de artículos enfocados en segmentar el sistema musculoesquelético se reduce considerablemente y únicamente se centran en la segmentación de elementos óseos y protésicos por medio de algoritmos externos¹⁷.

En este caso, a la cantidad de tiempo invertida en el proceso de segmentación se le suma el tiempo que tarda la estación de trabajo en procesar toda la información del *software* para poder generar la reconstrucción 3D, esto supuso un gran problema logístico, ya que para el uso de *3D Slicer* de manera óptima se requieren equipos informáticos de gran potencia.

Conclusiones

Es cierto que el programa *3D Slicer* presenta numerosas ventajas en gran medida debido a que es un programa de acceso libre y presenta acceso a extensiones que amplían sus posibilidades.

No obstante, la utilidad del programa por sí solo (sin funciones externas) depende en gran medida del elemento anatómico segmentado y de la prueba de imagen utilizada para ello. Esto hace que su posible uso con fines clínicos o didácticos a la hora de representar la articulación de la rodilla sea dudoso debido a la distorsión de ciertas estructuras y la limitación para modelar algunos elementos.

La necesidad de un operador habilidoso y la gran cantidad de tiempo que se necesita para la representación de una estructura anatómica por medio de *3D Slicer*, hace que este programa resulte en este caso ineficiente. No se descarta su uso para pacientes concretos que tengan una situación clínica en la que el *3D Slicer* pueda llegar a ser de utilidad.

Bibliografía

1. Marcelo Gálvez M. Algunos hitos históricos en el desarrollo del diagnóstico médico por imágenes. Revista Médica Clínica Las Condes. 1 de enero de 2013;24(1):5-13.
2. González IH, Cabrera RT. Características, ventajas y limitaciones de los sistemas de adquisición digital de imágenes radiográficas. Monográfico: Radiología digital. Disponible en: http://www.conganat.org/SEIS/is/is45/IS45_45.pdf
3. Calzado, A., & Geleijns, J. (2010). Tomografía computarizada. Evolución, principios técnicos y aplicaciones. Revista De Física Médica, 11(3). Disponible en: <https://revistadefisicamedica.es/index.php/rfm/article/view/115>.
4. ALMA Medical Imaging. 2021. Reconstrucciones de imagen médica: ¿qué tipos hay? Disponible en: <https://alma-medical.com/reconstrucciones-imagen-medica-tipos/>
5. Alcaraz Baños M. Tomografía Computarizada. Disponible en: https://webs.um.es/mab/miwiki/lib/exe/fetch.php?media=lectura_9.pdf
6. Posadzy M, Desimpel J, Vanhoenacker F. Cone beam CT of the musculoskeletal system: clinical applications. Insights Imaging. 4 de enero de 2018;9(1):35-45.
7. Mehmet Kocak. Manual MSD versión para profesionales. [citado 10 de abril de 2024]. Resonancia Magnética - Estudios de imagen radiológica. Disponible en: <https://www.msdmanuals.com/es/professional/temas-especiales/principios-de-estudios-por-la-imagen-radiol%C3%B3gicas/resonancia-magn%C3%A9tica>
8. Lecouvet FE. Whole-Body MR Imaging: Musculoskeletal Applications. Radiology. mayo de 2016;279(2):345-65.
9. Chen MYM, Pope Jr. TL, Ott DJ. Radiologia Basica. Lange. 1ªEd. Madrid: McGRAW-HILL - INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.; 2006.
10. Herring W. Radiología básica: Aspectos fundamentales. 5ª Ed. Barcelona: Elsevier; 2024.
11. ¿Qué es el formato DICOM? [Internet]. IMTRA-Instituto Madrileño de Traumatología. 2018. Disponible en: <https://imtra.es/que-es-el-formato-dicom/>
12. Virzì A, Muller CO, Marret JB, Mille E, Berteloot L, Grévent D, et al. Comprehensive Review of 3D Segmentation Software Tools for MRI Usable for Pelvic Surgery Planning. J Digit Imaging. febrero de 2020;33(1):99-110.

13. Velazquez ER, Parmar C, Jermoumi M, Mak RH, van Baardwijk A, Fennessy FM, et al. Volumetric CT-based segmentation of NSCLC using 3D-Slicer. *Sci Rep.* 18 de diciembre de 2013;3:3529.
14. Zhou L, Wang W, Li Z, Wei H, Cai Q, Chen Q, et al. Clinical application of 3D-Slicer + 3D printing guide combined with transcranial neuroendoscopic in minimally invasive neurosurgery. *Sci Rep.* 28 de noviembre de 2022;12:20421.
15. Chen Z, Wang Y, Li X, Wang K, Li Z, Yang P. An automatic measurement system of distal femur morphological parameters using 3D slicer software. *Bone.* 1 de marzo de 2022;156:116300.
16. T. Thomas HM, Devakumar D, Sasidharan B, Bowen SR, Heck DK, James Jebaseelan Samuel E. Hybrid positron emission tomography segmentation of heterogeneous lung tumors using 3D Slicer: improved GrowCut algorithm with threshold initialization. *J Med Imaging (Bellingham).* enero de 2017;4(1):011009.
17. Brenneis M, Flevas DA, Bornes TD, Braun S, Meurer A, Sculco PK, et al. Tibial bone defect prediction based on preoperative artefact-reduced CT imaging is superior to standard radiograph assessment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2023;31(11):4842-50.

Anexo 1: Descripción radiológica de la anatomía de la rodilla

La articulación rodilla forma la transición desde el muslo hasta a la pierna, transmitiendo el peso del cuerpo. Está constituida por la epífisis distal del fémur, la proximal de la tibia y la rótula; formando las articulaciones femoropatelar y femorotibial.

Se trata de una articulación que funciona como una tróclea que permite un amplio movimiento de flexión y extensión, y debido a su morfología permite la rotación no muy amplia de la pierna en su eje vertical gracias a los cóndilos femorales siendo en su conjunto una articulación cóndilo-troclear.

Sustrato Óseo

Epífisis distal del fémur

Este hueso largo que termina en una parte más voluminosa y ancha en sentido transversal que presenta dos cóndilos terminales que están separados por la escotadura intercondílea y que descansan sobre la meseta tibial (Figura 1). En su cara anterior existen dos carillas articulares que convergen formando la tróclea femoral, superficie de la articulación femopatelar y que se continúa con la escotadura intercondílea.

Rótula

Se trata de un hueso corto y aplanado (Figura 1), pudiéndose considerar sesamoideo, presentando dos carillas articulares (separadas por una arista) en su cara posterior que se articulan con la tróclea femoral, permitiendo los movimientos de flexoextensión.

Presenta una cara anterior convexa y rugosa y un vértice inferior que le da una morfología triangular.

Epífisis proximal de la tibia

La extremidad superior de la tibia (Figura 1) es también más ancha y voluminosa en sentido transversal, la cara superior se denomina la meseta tibial, formada por dos superficies excavadas denominadas cavidades glenoideas tibiales externa e interna, que descansan sobre los cóndilos tibiales, sobre las se apoyan los cóndilos femorales,

formando la articulación femorotibial (doble condílea) que permite los movimientos de flexoextensión y la rotación de la pierna con la rodilla en semiflexión.

Las cavidades glenoideas convergen en la parte media de la tibia formando la eminencia intercondílea, con dos tubérculos medial y lateral, que separa las áreas intercondíleas anterior y posterior.

La extremidad superior de la tibia presenta los cóndilos interno y externo. El externo presenta una superficie que se articula con la epífisis proximal del peroné formando la articulación peroneotibial superior que no forma parte de la articulación de la rodilla, pero sirve como punto de inserción de ligamentos y tendones.

En la cara anterior de la epífisis está tuberosidad anterior en la que se inserta el ligamento rotuliano.

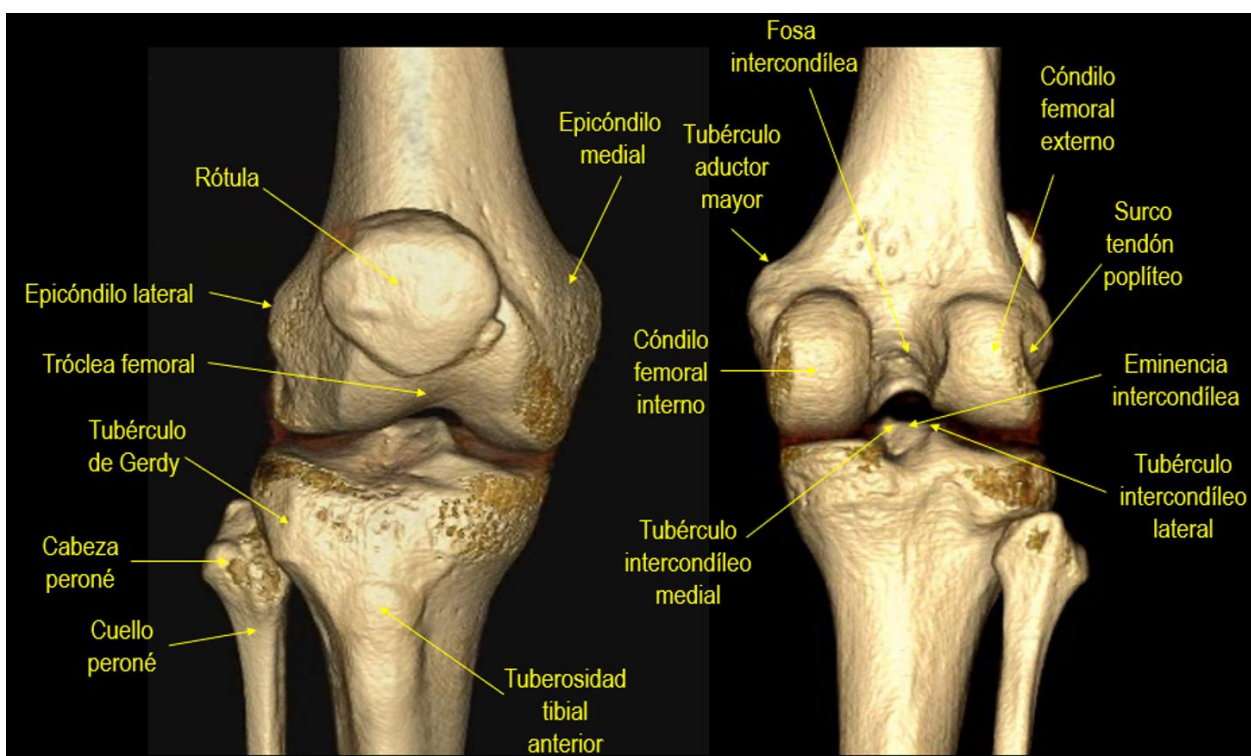


Figura 1. Reconstrucción TC 3D de la articulación de la rodilla.

Cartílagos articulares y Meniscos

Tanto los cóndilos femorales como ambas carillas articulares de la rótula y las cavidades glenoideas de la tibia se encuentran revestidas de cartílago hialino facilitando la adherencia entre las superficies de los elementos del sustrato óseo y disminuyendo el rozamiento durante la movilidad articular.

A pesar de la presencia de cartílago articular en las cavidades glenoideas, sigue habiendo discordancia articular entre estas y los cóndilos femorales. Dos fibrocartílagos denominados meniscos (lateral y medial) (Figura 2) asientan sobre las cavidades glenoideas facilitando la transmisión de fuerzas desde el fémur hacia la tibia.

El borde externo de los meniscos presenta mayor altura y se une a la cápsula articular, el borde interno es más aplanado y se orienta hacia la región interna de la cavidad glenoidea.

Sus caras superiores son cóncavas adaptándose a los cóndilos femorales, mientras que las caras inferiores son aplanadas y no se encuentran unidas a la superficie tibial.

La parte anterior y posterior de cada menisco forman unas astas constituidas por fibras que se unen al sustrato tibial en las áreas intercondíleas anterior y posterior.

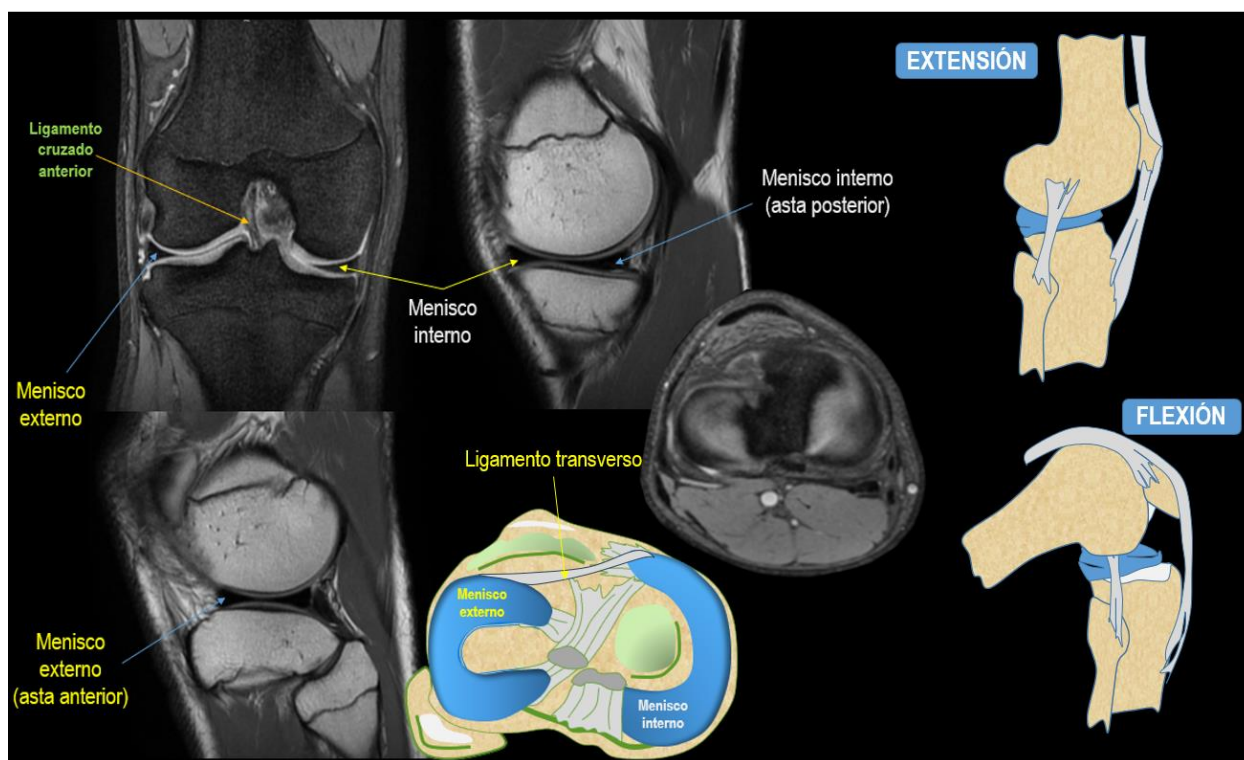


Figura 2. Meniscos de la rodilla e inserciones tibiales de los ligamentos cruzados. Composición sobre RM axial.

Cápsula articular

Se trata de un revestimiento de tejido fibroso que recubre la articulación de la rodilla dejando margen para permitir los movimientos de flexión y extensión (Figura 3).

Por norma general, la cápsula articular se inserta próxima a los rebordes de las superficies articulares dejando un mayor margen sobre el hueco supratroclear. En la región posterior,

en el hueco poplíteo está más distendida, permitiendo el paso de elementos conectivos y vasculonerviosos.

Membrana sinovial

Tejido seroso que reviste la cápsula interna de la cavidad articular y, al llegar a la inserción de esta; forma un reborde y continúa revistiendo las superficies óseas hasta llegar a los cartílagos articulares, alrededor de los cuales se inserta. En regiones donde la cápsula articular se inserta más alejada de las carillas articulares se forman fondos de saco sinoviales (Figura 3).

Es importante tener en cuenta que además de rodear las superficies articulares, la membrana sinovial se inserta en los bordes superior e inferior de la superficie convexa de los meniscos, separando la sinovial en dos regiones, una femoromeniscal y otro meniscotibial.

La membrana sinovial se prolonga desde la parte posterior a través del espacio intercondíleo pasando anterior a los ligamentos cruzados, quedando estos fuera de la membrana sinovial, pero dentro de la capsula articular.

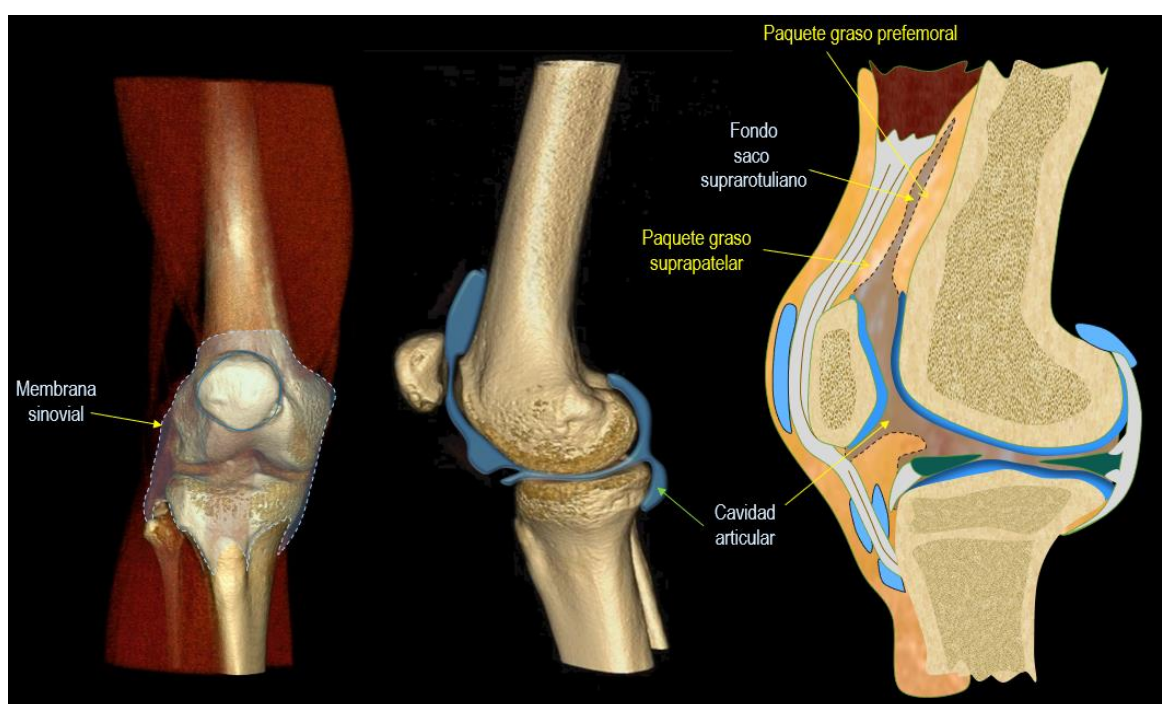


Figura 3. Cavidad articular de la rodilla. Composición sobre TC 3D y esquema de la cavidad articular de la rodilla.

Ligamentos

Los ligamentos que forman parte de la articulación de la rodilla se distribuyen por la región anterior (Figura 4), lateral (Figura 5) y posterior reforzando la cohesión articular que ya de por sí ejerce la capsula articular.

Región anterior

I. Ligamento rotuliano. Se trata de una expansión del tendón del cuádriceps que se inserta en el vértice inferior de la rótula y en su cara anterior extendiéndose inferiormente para insertarse en la parte media e inferior de la tuberosidad anterior de la tibia.

II. Retináculos rotulianos. Al igual que el ligamento rotuliano estos dos ligamentos, lateral y medial son expansiones fibrosas que surgen del vasto externo y del vasto interno respectivamente.

Estas expansiones ligamentosas que parten de los vastos del cuádriceps siguen dos recorridos: a) en dirección descendente insertándose en el borde de la rótula continuando hacia abajo para fusionarse con el borde del ligamento rotuliano y con el cóndilo tibial de su mismo lado; b) el fascículo ligamentoso de cada lado cruza al lado opuesto, por delante de la rótula, siguiendo una dirección oblicua y descendente, para unirse al borde del ligamento rotuliano y al cóndilo femoral del lado opuesto.

III. Aletas rotulianas. En un plano más profundo se encuentran insertadas en los bordes lateral y medial de la rótula, para continuar posteriormente y terminar en los epicóndilos femorales.

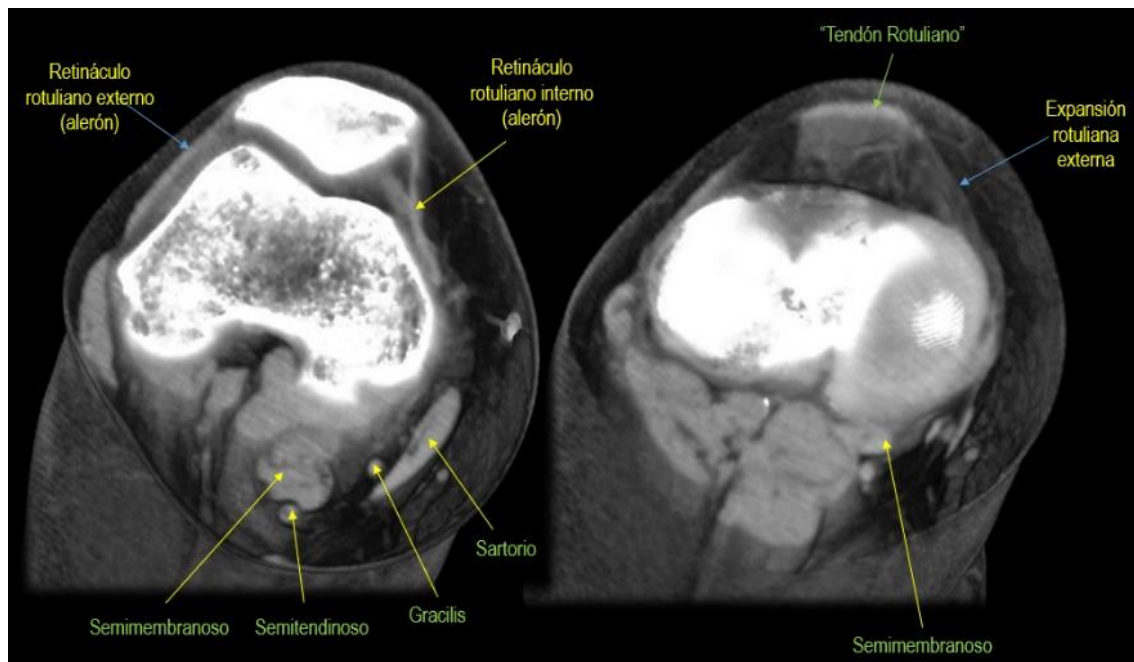


Figura 4. Reconstrucción TC 3D. En la parte anterior de la rodilla se encuentran el tendón del cuádriceps, la rótula y el tendón rotuliano. El ligamento alar o rotuliano interno (patelofemoral) une el borde de la rótula al epicóndilo interno del fémur y el externo al epicóndilo externo femoral.

Región Lateral

I. Ligamento colateral tibial o interno. Está dividido en dos partes, una principal y otra accesoria.

La porción principal nace del epicóndilo femoral interno, cubierta por la aleta rotuliana medial; descendiendo anteriormente para insertarse en el menisco y el cóndilo tibial del mismo lado. Parte de las fibras de este fascículo principal continúan descendiendo, recubriendo el tendón reflejo del semimembranoso e insertándose en la cara medial de la tibia.

El fascículo accesorio se compone de fibras que irradian de las inserciones de la parte principal para terminar en la cara periférica del menisco medial.

II. Ligamento colateral peroneo o externo. Sigue un recorrido descendente y anterior desde el epicóndilo lateral del fémur para insertarse en la porción anterolateral de la cabeza del peroné

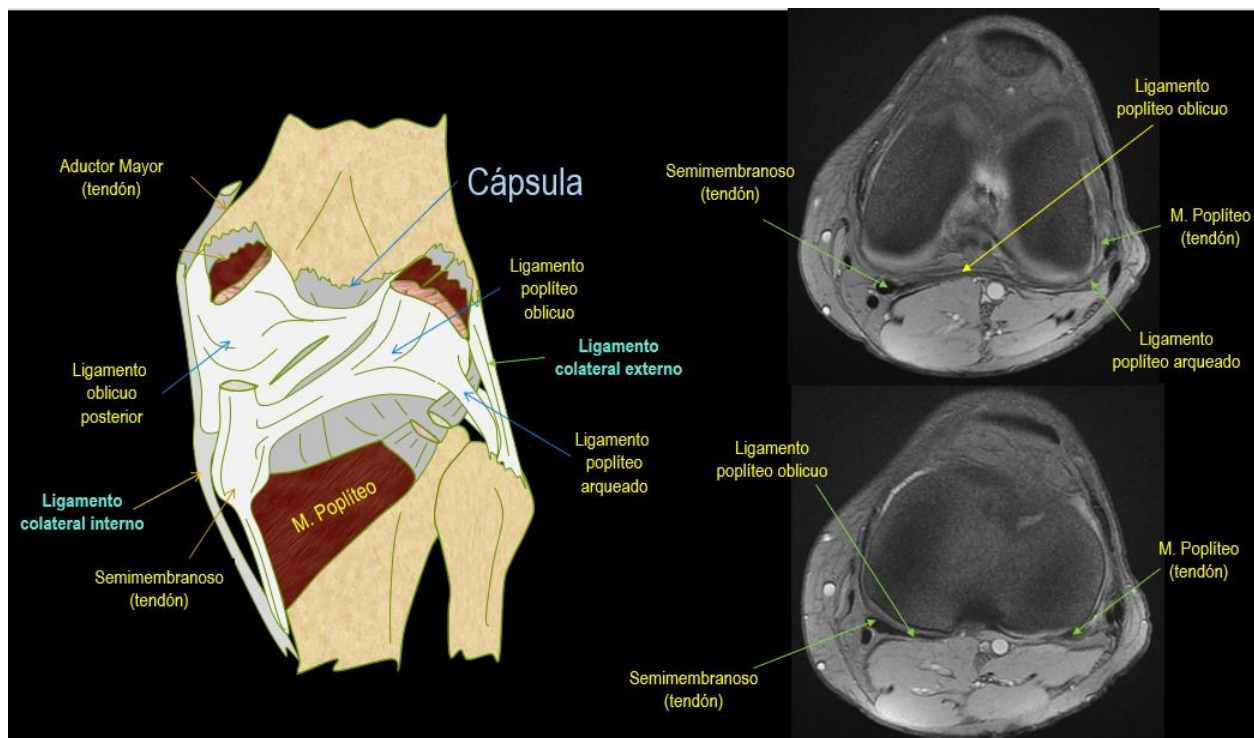


Figura 5. Estructuras laterales y posteriores. El ligamento poplíteo oblicuo o tendón recurrente une el tendón del músculo semimembranoso al cóndilo externo del fémur. El ligamento poplíteo arqueado une el cóndilo externo del fémur con la cabeza del peroné.

Región Posterior

I. Ligamento cruzado anterior. Se inserta en la cara intercondílea del cóndilo lateral del fémur para descender medialmente y hacia adelante fijándose sobre la meseta tibial anterior al tubérculo intercondíleo medial. Su inserción tibial (Figura 2) se ubica anteromedial a la inserción del cuerno anterior menisco lateral y posterior a la del menisco medial.

II. Ligamento cruzado posterior. Este ligamento también presenta su inserción proximal en la región intercondílea femoral, sin embargo, este se fija en la cara intercondílea del cóndilo femoral medial, para descender lateralmente y hacia atrás hasta la depresión posterior del área intercondílea posterior de la tibia (Figura 2). Las inserciones del cuerno posterior del menisco lateral y del menisco medial en la tibia son anteriores a la inserción de este ligamento. Desde la asta posterior del menisco lateral emergen los ligamentos menisiofemorales anterior y posterior que acompañan en su trayecto al ligamento cruzado posterior.

Los ligamentos cruzados se cruzan a lo largo de su recorrido en el plano sagital y coronal, pero no axial.

III. Ligamento poplíteo oblicuo. El ligamento poplíteo oblicuo se dirige superior y lateralmente desde el tendón del semimembranoso, en su trayecto ascendente sus fibras se abren en abanico hacia el cóndilo lateral (Figura 5).

IV. Ligamento poplíteo arqueado. Nace de la cabeza del peroné y se divide en una porción lateral, que continua hacia arriba paralelo y posterior al ligamento colateral peroneo hasta llegar al cóndilo de ese mismo lado; y en una porción medial cuyas fibras se abren en abanico formando dos haces; a) superior que ascienden superomedialmente y se pierde en el plano fibroso siendo más profundas que el ligamento poplíteo oblicuo, b) inferior que se inclina y desciende medialmente insertándose en la tibia, delimitando el arco del músculo poplíteo, bajo el cual pasa dicho músculo (Figura 5).

Músculos

Plano anterior del muslo

Representado principalmente por el cuádriceps femoral (Figura 6), formado por el recto femoral, el vasto medial, el vasto lateral y el vasto intermedio. Estas cuatro cabezas musculares descienden anteriormente sobre el fémur para insertarse sobre la rótula mediante tendón rotuliano.

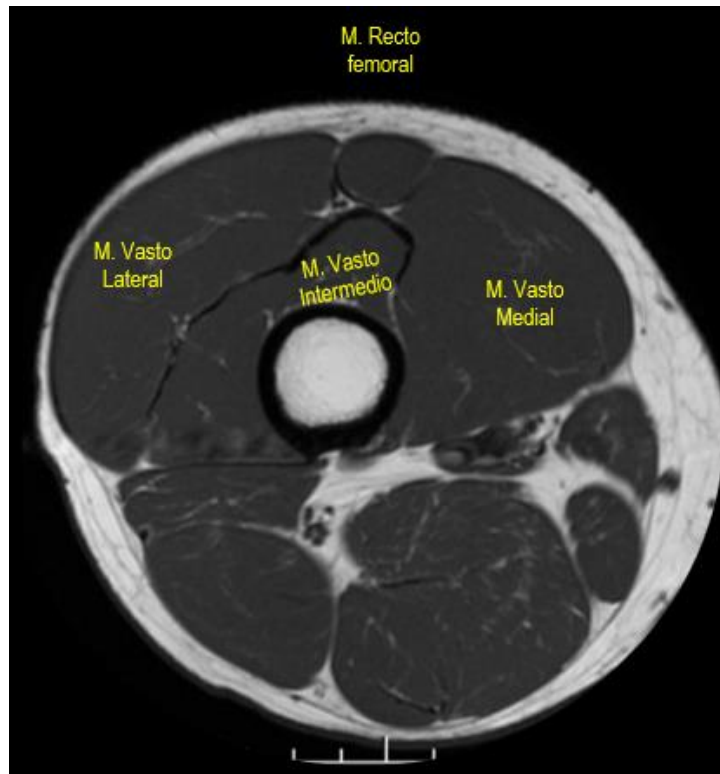


Figura 6. Corte axial de RM del muslo. Se representan los vientres musculares del cuádriceps femoral (recto femoral, vasto medial, lateral e intermedio o crural).

El músculo sartorio (Figura 4) desciende anterior al cuádriceps femoral cruzándolo en sentido lateromedial para llegar al cóndilo medial, el cual rodea para llegar a insertarse en la cara medial de la tibia.

Plano medial del muslo

El músculo grácil (Figura 4) desciende medial al fémur hasta llegar al cóndilo medial de la tibia, que contornea posteriormente. Continúa inferiormente por debajo del cóndilo medial para situarse en un plano anterior, donde el tendón se ensancha en abanico para insertarse en la cara medial de la tibia en un posterior a la inserción del sartorio.

Plano posterior del muslo

El músculo semimembranoso (Figura 4) desciende por la parte posterior y medial al fémur y termina en un tendón grueso que desciende posterior al muslo. Este tendón da lugar a tres expansiones: a) el tendón directo, que se inserta en la parte posterior del cóndilo medial de la tibia y que presenta algunas fibras que descienden inferiormente para insertarse en el borde medial de la tibia; b) el tendón recurrente, recubierto por el

ligamento colateral peroneo y c) el tendón reflejo, que forma el ligamento poplíteo oblicuo.

En un plano más superficial y posterior se encuentra el músculo semitendinoso (Figura 4), que desciende cubriendo al semimembranoso hasta llegar al cóndilo medial de la tibia, bordeándolo por la parte posterior e insertándose en la cara medial de la tibia.

El tendón del semitendinoso constituye el plano profundo de la llamada pata de ganso (Figura 7), formada también por el tendón del grácil y en un plano superficial el tendón del sartorio.

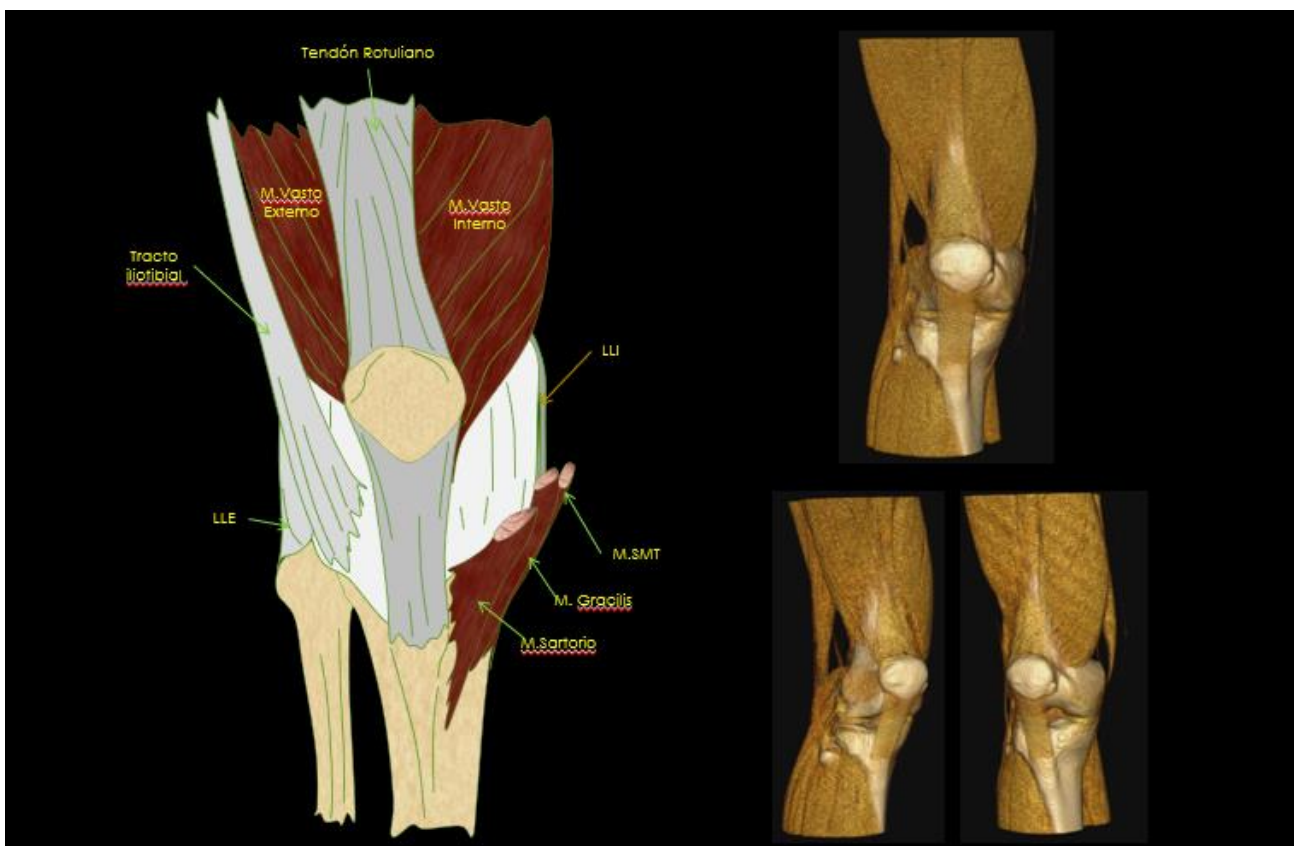


Figura 7. Composición del plano anterior de la rodilla. Reconstrucción 3D. Músculos sartorio, grácil y semitendinoso constituyen los planos superficial, medio y profundo de la pata de ganso respectivamente.

Por último, el bíceps femoral (Figura 8) también forma parte del grupo muscular posterior del muslo. Este músculo está constituido por dos fascículos musculares que descienden lateralmente al semitendinoso y terminan en un tendón común que se dirige posterior al cóndilo lateral fémur y hacia fuera para insertarse principalmente en el vértice de la cabeza del peroné.

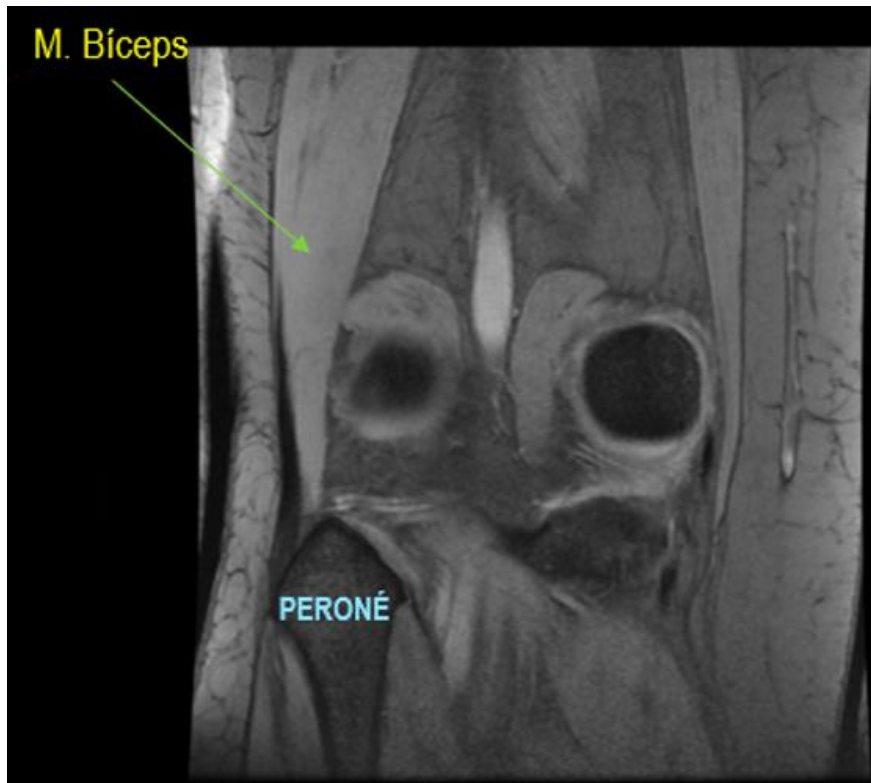


Figura 8. Corte coronal de la articulación de la rodilla. Bíceps femoral. Inserción distal.

Músculos de la pierna

De todos los músculos que forman parte de la pierna, únicamente contribuyen al movimiento de la rodilla el músculo poplíteo y el gastrocnemio, que forma parte del tríceps sural.

El poplíteo (Figura 5) se extiende desde el epicóndilo lateral del fémur, donde está cubierto por el ligamento poplíteo arqueado; hasta insertarse en la cara posterior de la tibia en una posición más medial.

Por otro lado, el músculo gastrocnemio (Figura 9) está formado por dos masas musculares: lateral y medial; cada una de las cuales se inserta en uno de los cóndilos femorales (lateral y medial respectivamente). Estos fascículos musculares descienden formando el músculo más superficial y posterior de la pierna hasta terminar en la parte media donde convergen en un tendón común, el tendón calcáneo.

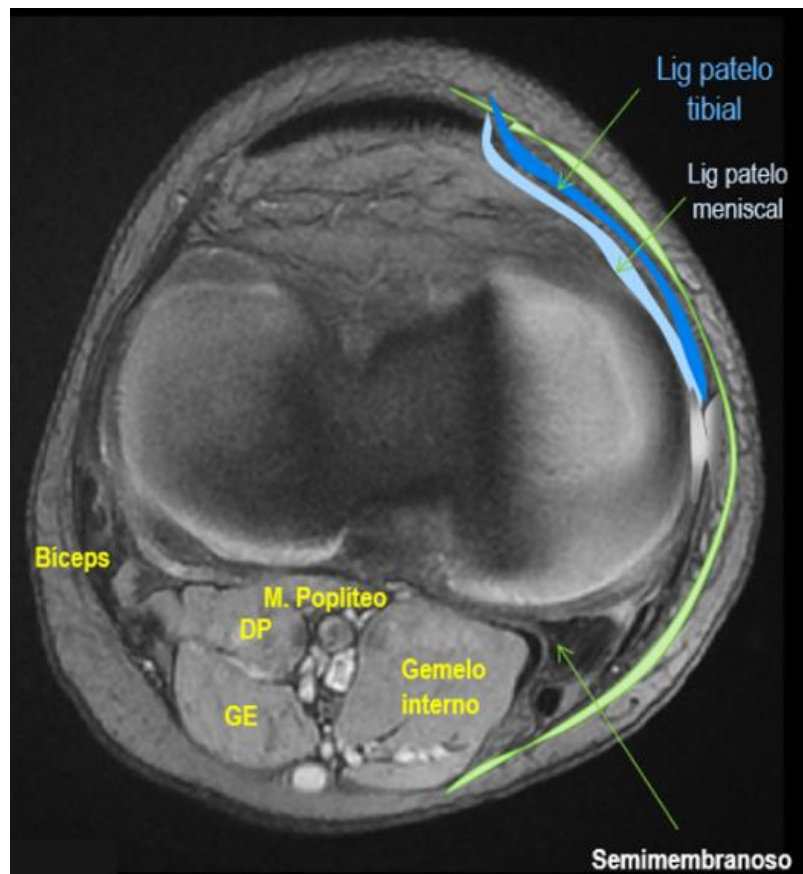


Figura 9. Estructuras de la cara posterior e interna de la rodilla.