

Imagenología médica: Fundamentos y alcance

Medical Imaging: Foundations and Scope

Yoleidy Huérfano, MgSc¹, Miguel Vera, MgSc. PhD^{1,4*}, Atilio Del Mar, MD², José Chacón, MgSc, PhD¹, María Vera, BSc¹¹, Nahid Bautista, MgSc⁴, María Sofía Martínez, MD³, Joselyn Rojas, MD, MgSc^{3,7}, Valmore Bermúdez, MD, MPH, MgSc, PhD³, Julio Contreras-Velásquez, MgSc, PhD(c)⁴, Modesto Graterol-Rivas, MgSc, PhD⁵, Sandra Wilches-Duran, MgSc, PhD(c)⁴, Maritza Torres, MD, PhD(c)⁸, Carem Prieto, MgSc, PhD(c)³, Wilson Siguencia, MD, PhD(c)⁸, Rina Ortiz, MD, PhD(c)⁹, Miguel Aguirre, MD, MgSc³, Lisse Angarita, MD, PhD(c)¹⁰, Marcos Cerda, MgSc⁴, Carlos Garicano, MD⁴, Juan Diego Hernández-Ladinde, MgSc³, Víctor Arias, Ing⁴, Rosemily Graterol-Silva, MgSc⁵, Maricarmen Chacín, MD, MgSc³, Antonio Bravo, MgSc, PhD⁷

¹Grupo de Investigación en Procesamiento Computacional de Datos (GIPCD-ULA) Universidad de Los Andes-Táchira, Venezuela.

²Instituto de Bioingeniería y Diagnóstico Sociedad Anónima (IBIDSA), San Cristóbal, Venezuela. e-mail: atiliodelmar@yahoo.com.

³Centro de Investigaciones Endocrino-Metabólicas "Dr. Félix Gómez" Facultad de Medicina. Universidad del Zulia., Venezuela.

⁴Grupo de Investigación Altos Estudios de Frontera (ALEF), Universidad Simón Bolívar, Cúcuta, Colombia.

E-mail de correspondencia: m.avera@unisimonbolivar.edu.co, veramig@gmail.com*

⁵Centro de Estudios de la Empresa. Universidad del Zulia, Venezuela.

⁶Pulmonary and Critical Care Medicine Department. Brigham and Women's Hospital. Harvard Medical School. Boston, MA. USA 02115.

⁷Coordinación de Investigación Industrial, Decanato de Investigación, Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, Venezuela. e-mail: antonio.j.bravo@gmail.com.

⁸Ministerio de Salud Pública del Ecuador. Distrito de Salud 01D02. Posgrado de Medicina Familiar. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

⁹Departamento de Internado Anatomía III. Facultad de Medicina. Universidad Católica de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

¹⁰Escuela de Nutrición y Dietética. Facultad de Medicina. Universidad Andrés Bello, Sede Concepción, Chile.

¹¹Escuela de Medicina, Universidad de Los Andes, Hospital Central de San Cristóbal. Edo. Táchira, Venezuela

Resumen

En la actualidad es innegable la utilidad de las diversas modalidades de imagenología médica como apoyo clínico tanto en la generación de diagnósticos de un buen número de enfermedades como en la planeación de tratamientos tendientes a proporcionar una alternativa de solución a las personas que, por una u otra razón, manifiestan algún desequilibrio en su salud. Entre las modalidades imagenológicas que, frecuentemente, se utilizan en el ámbito médico se pueden mencionar: Ultrasonido (US), Resonancia Magnética (MRI), Tomografía Computarizada sencilla (CT) y multicapa (MSCT), Tomografía Computarizada por Emisión de Positrones (PET) y Tomografía Computarizada por Emisión de Fotones simples (SPECT). En este sentido, este artículo tiene como finalidad presentar una descripción ordenada, coherente y sistemática de cada una de las mencionadas modalidades y establecer la vinculación de la MSCT con situaciones clínicas íntimamente relacionadas con la anatomía cardíaca y procesos de hipertensión. La razón por la cual se hace énfasis en la MSCT es debido a que, por una parte, se cuenta con un número importante de bases de datos tanto de sujetos fisiológicos como de sujetos patológicos y, por la otra, que se tiene previsto presentar un conjunto de técnicas computacionales que serán exploradas en el desarrollo de futuras investigaciones en el contexto de aspectos anatómico-cardiológicos que influyen directa o indirectamente en la aparición, desarrollo y prevalencia de procesos hipertensivos.

Palabras clave: Imágenes cardíacas, modalidades de imagenología, MSCT.

Abstract

Nowdays, several forms of medical imaging are usefulness in clinical support for both diagnostics diseases generation and treatment planning designed to provide an alternative solution to people who, for one or another reason, manifest an imbalance in your health. Among the imaging modalities that frequently are used in the medical field may include: Ultrasound (US), magnetic resonance imaging (MRI), simple computed tomography (CT) and multilayer computed tomography (MSCT), CT positron emission tomography (PET) Computed tomography and single photon emission (SPECT). In this sense, this article presents an orderly, coherent and systematic description of these modalities and it establishes relationship with the MSCT modality and clinical situations closely related to cardiac anatomy and hypertension processes. The reason emphasis on MSCT is done is because, on the one hand, we have a large number of databases both physiological subjects and pathological subjects and, on the other, we plan to present a set of computational techniques that will be explored in future research, in the context of cardiologic anatomical aspects, with directly or indirectly influence in the emergence, development and prevalence of hypertensive processes.

Keywords: Cardiac imaging, Imaging modalities, MSCT.

Introducción

El principal objetivo de la imagenología médica es generar información de gran importancia para la caracterización de la fisiología y/o anatomía de diversos órganos o partes del cuerpo humano. En particular, en el marco del presente artículo, se puede visualizar la imagenología cardíaca como el conjunto de modalidades de imagenología que permite la obtención de información, tanto cualitativa como cuantitativa, acerca de la morfología y el funcionamiento del corazón y de los grandes vasos.

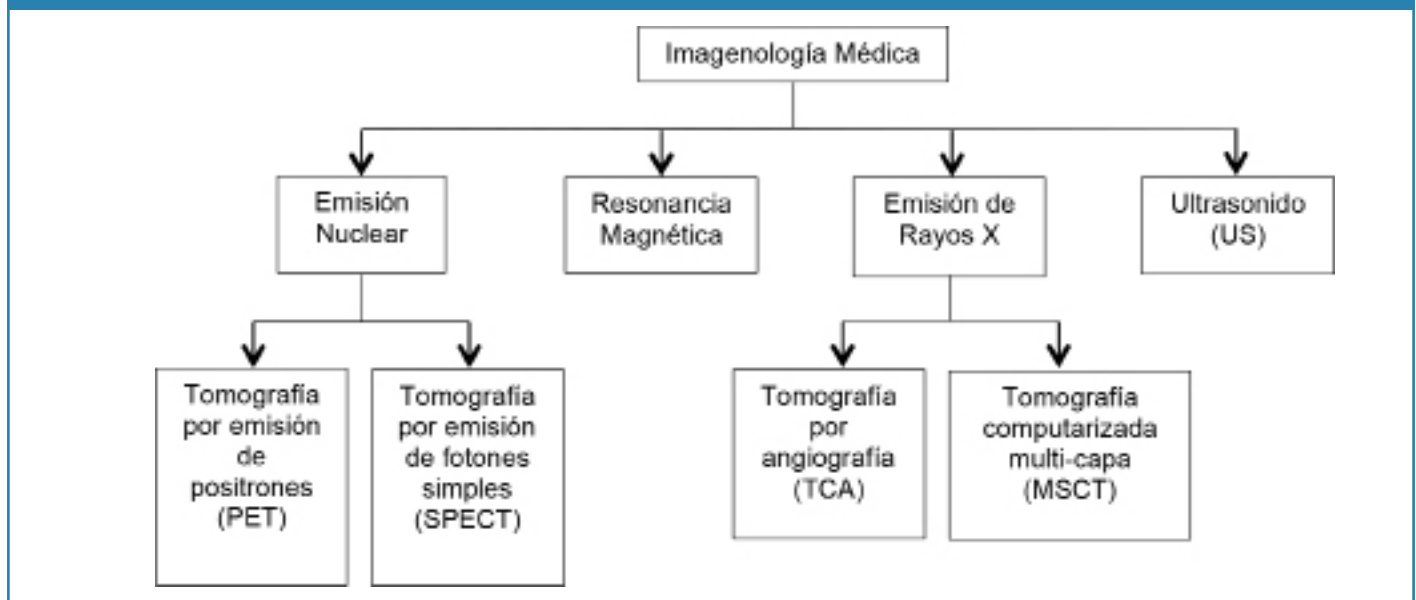
Entre las modalidades imagenológicas más importantes utilizadas en el contexto cardíaco se pueden mencionar: Ultrasonido (US), Tomografía computarizada sencilla (CT) y multi-capa (MSCT), Resonancia magnética (MRI), Tomografía por positrones (PET), Tomografía por emisión de fotones simples (SPET) y Angiografía Coronaria¹. Estas modalidades han sido usadas para cuantificar la perfusión miocárdica, la función ventricular cardíaca y la anatomía coronaria tanto dentro del contexto de la investigación como para el manejo clínico del paciente². El presente estudio hace una revisión y un análisis de las diversas modalidades de imagenología médica. El resto de las secciones del presente trabajo se organiza

de la siguiente manera: La Sección II, se dedica integralmente a establecer una visión general de las principales modalidades, usadas en imagenología médica. En la Sección III, se hace una breve descripción de la anatomía del corazón. Finalmente, se construyen las conclusiones, derivadas del proceso de revisión de las referidas técnicas de segmentación.

II. Descripción de las principales modalidades aplicadas en la adquisición de imágenes médicas

La Figura 1 muestra un esquema que aglomera las diversas modalidades de imagenología para la generación de imágenes médicas. Estas modalidades han sido empleadas, en el área cardíaca para la visualización, manejo, análisis y estudio del corazón y los grandes vasos. Así, por ejemplo, la cuantificación de la función ventricular, la evaluación de la perfusión del miocardio y la medición de los parámetros globales cardíacos, ha sido llevada a cabo empleando modalidades tales como tomografía computarizada, ecocardiografía y resonancia magnética. En esta sección se desarrolla una a descripción de los fundamentos teóricos que rigen el funcionamiento de las distintas modalidades de adquisición de imágenes médicas.

Figura 1. Visión integrada de las principales Modalidades de Imagenología Médica



A. Ultrasonido

Las imágenes obtenidas por Ultrasonido (US) son, esencialmente, una medida de la respuesta acústica de un impulso a una señal con una frecuencia particular. Normalmente, un transductor ultrasónico es capaz de producir ondas acústicas mediante la conversión de las energías térmica, eléctrica y magnética, en energía mecánica; siendo el efecto piezoeléctrico la técnica más eficiente al momento de realizar este proceso de conversión, para obtener imágenes médicas usando US.

El US del corazón, denominado ecocardiografía, permite la realización de estudios no invasivos de la anatomía de las estructuras intracardiacas. Cuando el estudio ecocardiográ-

fico se realiza en dos dimensiones se presenta como desventaja fundamental, la fuerte dependencia que el proceso global de generación de imágenes presenta con respecto al operador del equipo de ecocardiografía, ya que el referido operador debe hacer un proceso de reconstrucción mental para obtener la anatomía tridimensional a partir de la información 2D recabada; con las consecuencias que ello implica como, por ejemplo, la no reproductibilidad fiable de dicho proceso³. Debido a ello y a los avances que se han obtenido en el desarrollo de técnicas basadas en US, la ecocardiografía 2D se ha visto reemplazada, paulatinamente, por la ecocardiografía 3D. Tal vez, el avance más significativo lo constituye la innovación que se ha producido en la tecnología asociada al arreglo lineal de transductores, ya que este

tipo de arreglo tiene la propiedad de escanear, rápidamente, la respuesta acústica y permitirle a los médicos visualizar y analizar atributos dinámicos de las estructuras sometidas a estudio, como por ejemplo, los latidos y la movilidad del corazón⁴. Esta técnica 3D, posee mejores características que la modalidad de ecocardiografía 2D y sus prestaciones de servicio han posibilitado que se constituya en una modalidad de uso frecuente en la realización de estudios clínicos⁵.

Adicionalmente, la ecocardiografía en tres dimensiones es una de las modalidades de imagenología médica que mejor se proyecta, particularmente, en el diagnóstico clínico cardíaco debido a los significativos progresos que se han alcanzado en cuanto a preprocesamiento y análisis, usando esta modalidad 3D, con este tipo particular de imágenes.

B. Tomografía por Emisión Nuclear

La imagenología por emisión nuclear es una modalidad de imagenología funcional y es considerada una técnica de diagnóstico para medir la actividad metabólica de las células del cuerpo humano, para lo cual se requiere la inyección de ciertas moléculas biológicas denominadas radioisótopos. La tomografía computarizada por emisión de positrones (PET) y la tomografía computarizada por emisión de fotones simples (SPET) son modalidades o técnicas de imagenología nuclear que proporcionan información clínica acerca de procesos fisiológicos y bioquímicos derivados del cuerpo del paciente.

Estas técnicas están basadas en la visualización y cuantificación de la distribución de los rayos gamma emitidos por los radioisótopos inyectados, en el cuerpo del paciente, los cuales poseen una vida extremadamente corta⁶. La tomografía por emisión desempeña un papel fundamental en la medicina cardiovascular debido a que el daño cardíaco inicialmente se manifiesta como un conjunto de cambios fisiológicos y bioquímicos, los cuales se manifiestan, posteriormente, como cambios estructurales y solo hasta ese momento es que pueden ser detectados con otras modalidades de imagenología⁷.

1) Tomografía Computarizada por Emisión de Positrones (PET): Para obtener una imagen de Tomografía Computarizada por Emisión de Positrones (PET), se debe inyectar en el cuerpo del paciente una molécula biológica capaz de transportar un isótopo emisor de positrones. Pasados algunos minutos, desde que el isótopo es liberado, este se acumula en un área del cuerpo del paciente, por lo cual se afirma que el referido isótopo desarrolla una afinidad con dicha área, por ejemplo, la glucosa etiquetada como ¹¹C, se puede acumular en tumores donde la glucosa se usa como fuente de energía principal. Los núcleos radioactivos luego decaen emitiendo positrones, este es un proceso mediante el cual un protón del núcleo se transforma en dos partículas atómicas, ellas son: un electrón positivo (positrón) y un neutrón. De esta forma, aunque el átomo mantiene inalterado su masa atómica, disminuye en una unidad su número atómico. La combinación del positrón emitido y un electrón degenera en un proceso denominado aniquilación, que es el encargado de generar fotones. La alta energía asociada con los fotones hace que un conjunto de rayos gamma emerja del cuerpo del paciente, en direcciones opuestas. Estos rayos son detectados por

un arreglo de detectores ubicados alrededor del paciente. Luego de más de cien mil aniquilaciones, para generar las imágenes, se usa una serie de procesos de reconstrucción, tomando como referencia la distribución de las trazas emitidas por los positrones⁸.

2) Tomografía Computarizada por Emisión de Fotones Simples (SPECT): La Tomografía Computarizada por Emisión de Fotones Simples (SPECT), es una técnica de imagenología médica basada en la medicina nuclear convencional y que utiliza métodos de reconstrucción tomográficos. Los rayos gamma provenientes de los fotones emitidos, desde una distribución farmacéutica interna, penetran el cuerpo del paciente y luego de atravesar los tejidos del cuerpo son colimados y absorbidos por un detector (o un conjunto de detectores) de radiación. Estos fotones experimentan la correspondiente interacción con los tejidos intervinientes⁹. El efecto fotoeléctrico absorbe casi la totalidad de la energía de los fotones y por lo tanto, se detiene la emisión de radiación gamma. Otro efecto importante, que se produce durante este proceso, es el denominado efecto Compton, mediante el cual se transfiere parte de la energía remanente de los fotones a los electrones libres. El fotón original sufre entonces un proceso de dispersión, siendo desviado hacia una nueva dirección con energía reducida, es decir, con mayor longitud de onda la cual depende del ángulo de dispersión. Por otra parte, la gran mayoría de detectores de radiación empleados, actualmente, en los sistemas de adquisición de imágenes por SPECT, están basados en detectores de centelleo ya sean sencillos o múltiples. El desarrollo más significativo en medicina nuclear, lo constituye la cámara de centelleo que está basada en un cristal de una enorme área. Un arreglo de tubos fotomultiplicadores es colocado en la parte posterior del referido cristal, cuando un fotón impacta contra el cristal e interactúa con él se genera un centelleo, que será detectado por el mencionado arreglo de detectores. Luego, un circuito electrónico evalúa las señales relativas, provenientes de los detectores y determina la localización del fotón incidente en el cristal de centelleo¹⁰. En imagenología cardíaca, la SPECT ha sido usada para el diagnóstico del daño arterial coronario usando la perfusión del miocardio¹¹, la cuantificación de la función ventricular¹² y la identificación de estructuras miocárdicas¹³.

C. Tomografía por emisión de Rayos X

La tomografía computarizada por emisión de Rayos X (CT) es la más antigua de todas las modalidades de imagenología médica y ella permite el análisis, de una manera no invasiva, de estructuras internas del cuerpo humano con alta precisión y exactitud. El principal objetivo de la CT, es producir una representación 2D del comportamiento del coeficiente de atenuación, a través de secciones transversales, muy delgadas, del cuerpo humano. Los tejidos que componen las diversas estructuras del cuerpo presentan una composición elemental diferente, por esta razón, ellos tienden a proporcionar variadas respuestas cuando son expuestos a los Rayos X. De esta manera, la CT permite generar un conjunto muy completo de imágenes relativas a órganos del cuerpo humano, minimizando la presencia de artefactos producidos por la superposición de estructuras anatómicas, localizadas alrededor del órgano que se está estudiando. Cuando los Rayos

X pasan a través del cuerpo del paciente, son absorbidos y dispersados por las estructuras anatómicas localizadas en la trayectoria de los referidos rayos. La cantidad de radiación absorbida depende de la energía de los Rayos X y tanto de la composición como de la densidad anatómica de las mencionadas estructuras. Por otra parte, los métodos empleados para la reconstrucción de las imágenes 3D que componen los volúmenes explorados mediante CT, son clasificados en tres grupos. Ellos son: Métodos directos, Métodos algebraicos iterativos y métodos estadísticos^{14,15,16,17}.

En el contexto de las modalidades convencionales basadas en la emisión de Rayos X, son de suma utilidad en el contexto cardiaco las siguientes:

1) **Angiografía:** La angiografía permite la visualización de estructuras cardiacas en imágenes obtenidas en diversos planos de proyección, de esta manera, la angiografía es capaz de proveer suficiente información para la evaluación de tales estructuras a través del ciclo cardiaco completo. Típicamente, esta técnica usa un procedimiento denominado cateterismo para introducir en el corazón del paciente, un medio de contraste que posibilita la visualización de las estructuras cardiacas cuando la sangre entra y sale del corazón. En la actualidad, el uso de detectores digitales, en sistemas para la adquisición de imágenes basados en Rayos X, ha permitido elevar la calidad de las imágenes obtenidas por angiografía. Durante la etapa de adquisición, estos sistemas convierten la señal de Rayos X en imágenes digitales.

La información es capturada con un mínimo de pérdida y de esta forma se reduce la distorsión que, normalmente, producen los sistemas convencionales de angiografía. Esta técnica ha sido usada extensamente en el diagnóstico del daño isquémico y la evaluación del impacto de la estenosis en la arteria coronaria. Para ello, se ha hecho la estimación de parámetros como la fracción de eyección, volúmenes ventriculares y el gasto cardiaco, basándose en modelos geométricos simplificados, obtenidos a partir de imágenes 2D sin considerar la compleja morfología 3D de las cavidades del corazón¹⁸.

2) **Tomografía Computarizada Multicapa (MSCT):** La Tomografía Computarizada Multicapa (MSCT), se basa en la adquisición simultánea de más de un plano tomográfico, usando un sistema helicoidal y está, íntimamente, relacionada con los sistemas de adquisición que emplean múltiples detectores. Generalmente, un sistema básico de MSCT consta de un gantry, una mesa para ubicar en ella al paciente, una consola de control y una computadora. El gantry posee la fuente de Rayos X, el sistema de adquisición de información y el arreglo de detectores. El término helicoidal se acuñó dentro del ámbito de la tomografía multicapa debido a que cuando el paciente se traslada en dirección horizontal el gantry, simultáneamente, rota de manera continua lo cual produce una trayectoria en forma de helicoide¹⁹. Debido a su alta velocidad, esta técnica permite cubrir totalmente el volumen cardiaco y generar capas muy delgadas del mismo, en fases arbitrarias del ciclo cardiaco²⁰. Para producir imágenes de alta calidad, se hace necesario, por una parte, sincronizar el sistema de adquisición con el Electrocardiograma y por la otra, minimizar los efectos del movimiento del corazón in-

roduciendo, en el cuerpo de los pacientes, los denominados β -bloqueadores, cuya función es reducir la frecuencia cardiaca²¹. Los nuevos equipos, de tomografía multicapa, pueden generar bases de datos cardiacas, compuesta por volúmenes isotrópicos de alta resolución, por ejemplo, un equipo actual de MSCT, puede producir un volumen del corazón compuesto por veinte instantes cardiacos, de un número variable de cortes, con una resolución espacial de 512 x 512 píxeles, con una profundidad, relativa a los niveles de gris, de 16 bits. Debido a ello, esta modalidad imagenología puede ofrecer imágenes 3D de excelente calidad, tanto del corazón como de los grandes vasos, permitiendo la visualización de disecciones del corazón, en cualquier plano, lo que posibilita que las diversas estructuras cardiacas, presentes en este tipo de imágenes, se puedan analizar y relacionar con mucha precisión²². Mediante la aplicación de métodos de reconstrucción de los planos transaxiales, obtenidos durante el proceso de adquisición, el sistema puede generar una representación volumétrica de las estructuras cardiacas, sometidas a estudio²³.

D. Imagenología por Resonancia Magnética (MRI)

La técnica de adquisición de imágenes denominada Imagenología por Resonancia Magnética (MRI), es una modalidad de imagenología médica muy importante, desde el punto de vista clínico, debido al excepcional contraste que exhiben las imágenes generadas mediante ella. En contrapartida, esta técnica de adquisición presenta como principales desventajas su alto costo y la imposibilidad de acceder al paciente durante el proceso de adquisición. La MRI explota la existencia de un campo magnético inducido en el cuerpo del paciente. Los materiales que poseen un número impar de protones exhiben un momento magnético nuclear el cual, a pesar de ser muy débil, es observable. Este tipo de momento, normalmente, se orienta de manera aleatoria, sin embargo, cuando los referidos materiales son sometidos a campos magnéticos muy intensos, sus momentos tienden a alinearse de acuerdo a una orientación inducida por la polaridad dominante de dichos campos²⁴. Cuando la MRI se emplea para extraer información relacionada con las estructuras cardiacas se puede usar el término Resonancia Magnética Cardiovascular (CMR). La CMR es muy útil para la detección de enfermedades cardiacas congénitas, el stress de la pared miocárdica, tumores en estructuras cardiacas y enfermedades aorticas.

Otra aplicación importante de la CMR es la MRI etiquetada. Esta técnica permite el etiquetado de diversos planos que contienen regiones específicas del miocardio, en imágenes de resonancia magnética. Para ello, a fin de perturbar la magnetización de los protones prepresentes en una o más zonas del tejido cardiaco, es aplicado un pulso de radio frecuencia selectiva antes del proceso de adquisición. Una imagen de resonancia es obtenida, en un plano que es ortogonal respecto a un plano etiquetado particular, antes de que todos los protones recuperen la magnetización²⁵. Luego de un tiempo T, los protones perturbados recobran la magnetización original y generan un pulso de radio frecuencia que es detectado por el equipo de adquisición el cual produce una imagen etiquetada de la estructura analizada. El desplazamiento que se produce entre la imagen de resonancia y la etiquetada se refleja como un conjunto de franjas o zonas

de diferentes intensidades, en la imagen que entrega esta técnica. El número, posición, grosor e intensidad de estas zonas depende tanto del ángulo del pulso de radio frecuencia como de la intensidad y dirección del campo magnético apli-

cado²⁵. Para concluir esta sección, la Tabla 1 muestra una síntesis comparativa de las distintas modalidades descritas, mediante la cual se establecen las ventajas y desventajas, más significativas, de cada una de ellas.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las modalidades de imagenología descritas		
Modalidades	Ventajas	Desventajas
ULTRASONIDO	Ampliamente usada	Señal-Ruido muy baja
	Muy económica	Depende del operador
	Sin radiación ionizante	Resolución moderada
EMISION NUCLEAR	Contraste de buena calidad	Resolución baja
	Clínicamente validada	Uso de radiación
	Permite cuantificar la perfusión	Elevado tiempo de exploración
EMISION DE RAYOS X	Costo Moderado	Uso de Radiación
	Uso de agentes de contraste	Movimiento del sistema fuente-detector
RESONANCIA MAGNETICA	Buena resolución espacial	Muy costosa
	Sin radiación ionizante	Elevado tiempo de exploración

II. Anatomía cardiaca

Las diversas modalidades de adquisición de imágenes, descritas en la sección anterior, han proporcionado algunas de las herramientas de diagnóstico más eficaces en medicina. Esto permite, en general, la exploración de la estructura, función y patología de los órganos que componen el cuerpo humano, así como también la planificación de tratamientos y cirugías por parte de los especialistas. Adicionalmente, gracias al uso de dichas modalidades, se ha podido estudiar de una manera más sistemática la anatomía cardiaca, la cual se describe a continuación de manera breve. Los estudios por imágenes en cardiología tienen como objetivo, obtener información tanto cualitativa como cuantitativa de la morfología y la función del corazón y de los grandes vasos²⁶. El corazón está conformado por dos mitades: mitad derecha, relacionada con la sangre venosa, y mitad izquierda, relacionada con la sangre arterial. Estas mitades se dividen en otras dos, situadas una encima de otra: la cavidad superior llamada aurícula y la cavidad inferior denominado ventrículo. Cada aurícula está conectada con el ventrículo correspondiente a través una válvula. El corazón es el órgano encargado impulsar, mediante vasos sanguíneos, la sangre hacia el cuerpo. La aorta es la arteria que lleva la sangre oxigenada, desde el ventrículo izquierdo a otras partes del cuerpo; mientras que la arteria pulmonar transporta la sangre, para su oxigenación, desde el ventrículo derecho hacia los pulmones²⁷.

El estudio de la función cardiaca es muy importante en cardiología debido a que ella caracteriza el desempeño del corazón. Durante la eyección y el llenado de sangre de los ventrículos, el corazón sufre intensas deformaciones debido a la contracción y relajación, de las fibras musculares, generada por la acción de una señal eléctrica. Esta señal se produce en las aurículas y se propaga a los ventrículos. Por otra parte, el ciclo cardiaco consta de dos fases: la diastólica o de llenado de las cavidades y la sistólica o de expulsión del líquido sanguíneo²⁷. Normalmente, las cavidades del corazón laten en secuencia a través de las siguientes fases:

a.- Diástole Auricular. Las válvulas aortica y pulmonar se cierran, y la presión ventricular disminuye debido a la relajación del músculo ventricular. La sangre desoxigenada pasa a la aurícula derecha mientras la aurícula izquierda recibe la sangre oxigenada. La velocidad de llenado disminuye cuando las aurículas se dilatan. Durante la fase de llenado de las aurículas, las válvulas mitral y tricúspide permanecen cerradas.

b.- Diástole Ventricular. Las aurículas derecha e izquierda se contraen, haciendo que la sangre vaya a los ventrículos a través de las válvulas mitral y tricúspide. El llenado de los ventrículos es rápido al principio de la fase, haciéndose más lento a medida que se aproxima a la contracción cardiaca.

c.- Sístole Ventricular. El musculo ventricular aumenta la presión intraventricular y cuando las presiones de los ventrículos alcanzan un cierto umbral las válvulas pulmonar y aortica se abren. Luego la presión intraventricular aumenta hasta alcanzar su máximo y las válvulas mitral y tricúspide se cierran. Por último, la sangre contenida en el ventrículo derecho pasa a través de la arteria pulmonar hacia los pulmones; mientras que la contenida en el izquierdo va al resto del organismo por medio de la aorta²⁷.

Conclusiones

Mediante el presente trabajo, se ha realizado una revisión de las modalidades de imagenología médica de mayor importancia en el ámbito clínico.

Adicionalmente, se ha mostrado la relación que tienen dichas modalidades con la detección de patologías cardiacas.

También, se ha presentado un análisis comparativo de las ventajas y desventajas que presentan las modalidades imagenológicas descritas.

1. Kirisli H, Schaap M, Klein S, Neefjes L, Weustink A, Walsum T, Nissen W. Fully automatic cardiac segmentation from 3D CTA data: a multi-atlas based approach. *Proceedings of SPIE Medical Imaging*. 2010;7623. DOI: 10.1117/12.838370
2. Cerqueira M, Weissman N, Dilsizian V, Jacobs A, Kaul S, Laskey W, et al. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart a statement for healthcare professionals from the cardiac imaging committee of the Council on Clinical Cardiology of the American Heart Association. *Circulation*. 2002;105(4):539–42.
3. Hajnal J, Hill D, Hawkes D. *Medical Image Registration*. Boca Raton: CRC Press; 2001.
4. Pretorius D, Nelson T. Three-dimensional ultrasound. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. 1999;14(5):233-7.
5. Reba R. Nuclear medicine. *The Journal of the American Medical Association*. 1993;270(2): 230-33.
6. Garcia E, Faber T, Galt J, Cooke C, Folks R. Advances in nuclear emission pet and spect imaging. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 2000; 19(5): 21-33.
7. Budinger T, VanBrocklin H. Positron-emission tomography (pet). In: Mudry K, Plonsey R, Bronzino JD, editors. *The Biomedical Engineering Handbook*. Vol.1. 2aed. Boca Raton: CRC Press; 2000:1304-21.
8. Evans R. *The Atomic Nucleus*. New York:McGraw-Hill;1955.
9. Croft B, Tsui B. Nuclear medicine. In: Bronzino JD, editor. *The Biomedical Engineering Handbook*. Vol .1. 2a ed. Boca Raton: CRC Press LLC; 2000. 1215-46.
10. Matsumoto N, Berman D, Kavanagh P, Gerlach J, Hayes S, Lewin H, et al. Quantitative assessment of motion artifacts and validation of new motion-correction program for myocardial perfusion spect. *Journal of Nuclear Medicine*. 2001;42(5):687-94.
11. Nakajima K, Higuchi T. Quantitative assessment of motion artifacts and validation of new motion-correction program for myocardial perfusion spect. *Journal of Nuclear Medicine*. 2001;42(10):1571-78.
12. Debreuve E, Barlaud M, Aubert G, Laurette I, Darcourt J. Space-time segmentation using level set active contours applied to myocardial gated spect. *IEEE Medical Imaging*. 2001;20(7):643-59.
13. Gore J, Orr J. Image formation by back-projection: A reappraisal. *Physics in Medicine and Biology*.1979;24(4):793-801.
14. Gordon R, Bender R, Herman G. Algebraic reconstruction techniques (art) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography. *Journal of Theoretical Biology*.1970;29(9):471-82.
15. Jiang M, Wang G. Convergence studies on iterative algorithms for image reconstruction. *IEEE Medical Imaging*. 2003;22(5):569-79.
16. Lange K, Carson R. EM reconstruction algorithms for emission and transmission tomography. *Journal of Computed Assisted Tomography*.1984;8(3):306-16.
17. Kennedy J, Trenholme S, Kaiser I, Wash S. Left ventricular volume and mass from single-plane cineangiogram. A comparison of anteroposterior and right anterior oblique methods. *American Heart Journal*.1970;80(3):343-52.
18. Kalender W, Sissler W, Klotz E, Vock P. Spiral volumetric ct with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology*. 1990;176(1):181-83.
19. Cunningham I, Judy P. Computed tomography. In Mostafa A, Bronzino JD, Peterson DR, editors. *Medical Imaging: principles and practices*. Boca Raton: CRC Press LLC; 2013. 1157-72.
20. Shim S, Kim Y, Lim S. Improvement of quality with b-blocker pre-medication on ecg-gated 16-mdct coronary angiography. *American Journal of Roentgenology*. 2005;184(2): 649–54.
21. Faletra F, Pandian N, Ho S. *Anatomy of the heart by multislice computed tomography*. New York: John Wiley & Sons; 2008.
22. Heiken J, Brink J, Vannier M. Spiral (helical) c t. *Radiology*.1993;189(3):647-56.
23. Macovski A, Pauly J, Schenck J, Kwong K, Chesler D, Hu X, et al. Magnetic resonance imaging. In Bronzino JD, editor. *The Biomedical Engineering Handbook*.Vol.1.2a ed. Boca Raton: CRC Press LLC; 2000. 1174–1215.
24. Zerhouni E, Parish D, Rogers W, Yang A, Shapiro E. Human heart: Tagging with mr imaging – a method for non invasive assessment of myocardial motion. *Radiology*.1988; 169(1):59–63.
25. Ayache N. *Medical computer vision, virtual reality and robotics. Image and Vision Computing*. 1995;13(4):295–313.
26. Guyton A, Hall J. *Textbook of Medical Physiology*. USA: Elsevier Saunders; 2006.
27. Shapiro L, Stockman G. *Computer vision*. New Jersey: Prentice Hall; 2001.