

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico.

Autores:

Ana Gabriela Bambú Jaén

<https://orcid.org/0009-0000-8884-1864>

Universidad Santander

abambu@mail.usantander.edu.pa,

Panamá, Ciudad de Panamá

Ariatna Alexandra Hernández Taton

<https://orcid.org/0009-0000-6916-4845>

Universidad Santander

ahernandez@mail.usantander.edu.pa,

Panamá, Ciudad de Panamá

Bryan Alexis Loaiza Valladares

<https://orcid.org/0009-0004-5742-8945>

Universidad Santander

bloaiza@mail.usantander.edu.pa,

Panamá, Ciudad de Panamá

Resumen

El presente artículo analiza el papel de la imagenología en la planificación de la braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico y los avances de este tratamiento para el beneficio de las pacientes, en Panamá el cáncer ginecológico se posiciona como uno de los más comunes a nivel nacional, es por ello que se considera necesario conocer los protocolos más favorables para llevar a cabo el tratamiento de braquiterapia. Se realizó una revisión teórica sobre el uso de la imagenología en la braquiterapia de alta tasa de dosis como tratamiento para el cáncer ginecológico y de esta manera conocer que técnica de imagen era considerada la más viable, para ello se utilizó como técnica la recopilación documental y como instrumento de recolección de datos se implementó una matriz bibliográfica en donde se recopiló la información de cinco estudios publicados entre 2020 y 2025. Se observó que la imagenología forma parte fundamental en la planificación del tratamiento de braquiterapia de alta tasa de dosis en cáncer ginecológico, parte de esto incluye la evaluación previa del paciente que permite conocer la extensión de la enfermedad, determinar la cantidad de dosis y la distribución de esta, la delimitación de los volúmenes blanco como el volumen tumoral macroscópico o el volumen de tratamiento clínico, y de los órganos a

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

riesgo. La Tomografía Computarizada (TC) al igual que la Resonancia Magnética (RM) son métodos adecuados para la determinación de los órganos a riesgo y para la delimitación de los volúmenes blanco, sin embargo, los autores resaltan la preferencia sobre la RM por ofrecer una mayor resolución de tejidos blandos y precisión anatómica. Con el paso del tiempo se han introducido nuevas técnicas para potenciar el tratamiento, así es como se ha desarrollado la Braquiterapia Guiada por Imagen 3D (BTGI3D), la braquiterapia de aplicación única multifraccionada, sistemas como la interfaz de optimización interactiva (IOI).

Palabras claves: Cáncer, Braquiterapia, Resonancia Magnética, Tomografía Computarizada.

Advances in the application of high-dose-rate brachytherapy in patients with gynecological cancer: a theoretical review and imaging approach.

Abstract

This project analyzes the role of imaging in planning high-dose-rate brachytherapy in patients with gynecological cancer and the advances in this treatment for the benefit of patients. In Panama, gynecological cancer is one of the most common cancers nationwide. Therefore, it is considered necessary to understand the most favorable protocols for brachytherapy treatment. A theoretical review was carried out on the use of imaging in high-dose-rate brachytherapy as a treatment for gynecological cancer and in this way to know which imaging technique was considered the most viable, for this, documentary collection was used as a technique and a bibliographic matrix was implemented as a data collection instrument where information from five studies published between 2020 and 2025 was collected. It was observed that imaging is a fundamental part in the treatment planning of high-dose-rate brachytherapy in gynecological cancer, part of this includes the prior evaluation of the patient that allows knowing the extent of the disease, determining the amount of dose and its distribution, the delimitation of the target volumes such as the macroscopic tumor volume or the clinical treatment volume, and the organs at risk. Computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) are suitable methods for determining organs at risk and delineating target

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

volumes. However, the authors emphasize their preference over MRI due to their greater soft tissue resolution and anatomical accuracy. Over time, new techniques have been introduced to enhance treatment, such as the development of 3D Image-Guided Brachytherapy (3DIGBT), single-dose multifractionated brachytherapy, and systems such as the Interactive Optimization Interface (IOI).

Keywords: Cancer, Brachytherapy, Magnetic Resonance Imaging, Computed Tomography.

Introducción

El cáncer ginecológico representa un problema de salud pública a nivel mundial. Al año 2022 se registraron 661,044 nuevos casos de cáncer de cuello uterino y unas 350,000 mujeres murieron a causa de esta enfermedad (1). También se registraron 324,603 de cáncer de ovario y 417,367 de cáncer de endometrio y se estimaron aproximadamente 45,000 casos de cáncer de vulva y 17,000 de vagina. Con respecto a América Latina y el Caribe, los casos de cáncer ginecológico combinados al 2022 dieron un estimado de 112,360 casos nuevos y 53,018 muertes. Sin embargo, en América Latina, solo el 20% de la población está cubierta por registros de cáncer de alta calidad, lo que puede subestimar las cifras reales.

A pesar de los avances en el diagnóstico y tratamiento, la región enfrenta desafíos en la aplicación efectiva de la Braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR) como tratamiento para el cáncer ginecológico, debido a la falta de consenso sobre protocolos de tratamientos óptimos y la limitada disponibilidad de recursos tecnológicos y capacitación especializada, principalmente en el idioma español.

La Braquiterapia de alta tasa de dosis como tratamiento para el cáncer ginecológico, ha sido introducida con éxito en Panamá y su accesibilidad ha crecido con el pasar de los años, por lo que es necesario darle visibilidad a esta nueva tecnología y sobre todo estudiar el rol que tiene la imagenología dentro del procedimiento. Las tecnologías de imagen avanzadas, como la Resonancia Magnética o la Tomografía Computarizada, han transformado la planificación de la Braquiterapia de alta tasa de dosis en cánceres ginecológicos.

Este artículo está basado en una revisión bibliográfica de estudios existentes sobre los

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

avances en la aplicación de la Braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico y cómo influye la imagenología en su eficacia. Se describe el papel de la imagenología dentro del tratamiento y las técnicas de imagen empleadas.

Objetivo general:

Analizar los avances en la aplicación de la braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico y su integración con tecnologías de imagenología.

Metodología

Investigación cualitativa con alcance descriptivo y de tipo transversal, que consiste en la revisión de cinco estudios publicados entre 2020 y 2025. La investigación estará basada en datos globales disponibles en bases científicas como PubMed, SciElo, Google Scholar, o revistas especializadas en oncología y radioterapia. Se identificó en los estudios seleccionados las siguientes categorías: tipo de cáncer ginecológico tratado, nuevas tecnologías de aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis, técnicas imagenológicas utilizadas en la planificación, y criterios de validación. La información fue sintetizada por medio de un instrumento validado por expertos, donde primero se extraían datos bibliográficos, y luego se detallaban los aspectos más relevantes en base a las categorías y subcategorías de investigación y demás datos relevantes.

Consideraciones éticas

Esta investigación fue revisada por el Comité de Bioética de la Universidad Santander, quienes a través de una carta de exención se estableció que esta no requiere aprobación regulatoria por parte del comité, debido a que no clasifica como una investigación con seres humanos.

Para asegurar el cumplimiento de los principios éticos se implementaron las siguientes acciones: para garantizar la calidad y validez de la información, se seleccionaron únicamente publicaciones de portales científicos confiables como revistas científicas indexadas o bases de datos bibliográficas (por

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

ejemplo, PubMed, Google Scholar). Toda la información extraída fue debidamente referenciada, evitando cualquier forma de plagio o apropiación indebida de ideas. Se realizó una citación adecuada según el formato APA 7 para el reconocimiento de la autoría, esto incluye citar correctamente datos, tablas, figuras o cualquier material que se incorporó al análisis, respetando los derechos de propiedad intelectual.

Aunque esta investigación no involucra datos primarios de pacientes, se respetaron las normas éticas asociadas a los estudios originales revisados, es decir, si se utilizan datos agregados (por ejemplo, tasas de éxito o efectos secundarios), se presentan sin intentar identificar a individuos o alterar su contexto original.

Los resultados se presentan de forma clara, incluyendo tanto resultados positivos como limitaciones reportadas en la literatura, sin manipular la información para favorecer una conclusión predeterminada que puedan inducir a error o generar expectativas injustificadas sobre la braquiterapia o las tecnologías imagenológicas en el ámbito clínico.

Resultados

Para mayor facilidad y comprensión de los resultados, se abrevian cada uno de los estudios consultados de la siguiente forma:

- Estudio 1: braquiterapia guiada por imágenes con planificación 3D en cáncer de cuello uterino (2).
 - Estudio 2: braquiterapia de alta tasa de dosis de aplicación única multifraccionada guiada por imágenes para el cáncer de cuello uterino: resultados clínicos y dosimétricos (3).
 - Estudio 3: planificación interactiva del tratamiento de braquiterapia de alta tasa de dosis para cáncer ginecológico (4).
 - Estudio 4: braquiterapia 3D guiada por la imagen (5).
-

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

- Estudio 5: braquiterapia adaptativa guiada por resonancia magnética para el cáncer cervical localmente avanzado: experiencia del Hospital Carlos Van Buren (6).

A continuación, se presenta la información recopilada de estos estudios por medio del instrumento de análisis de datos.

Tabla 1.

Matriz Bibliográfica.

Matriz bibliográfica

Estudio 1

Titulo:	Braquiterapia guiada por imágenes con planificación 3D en cáncer de cuello uterino	Instrumentos/técnicas/procedimientos realizados:	Se realizó un estudio descriptivo, observacional, de las pacientes con diagnóstico de carcinoma de cuello uterino que fueron tratadas con BTGI3D con implantes úterovaginales en el Servicio de Braquiterapia Oncológica San Román del Urológico San Román, durante los años 2021-2023. Las pacientes recibieron braquiterapia (posterior a radioterapia externa) concurrente con quimioterapia. La realización del implante fue guiada por ultrasonido. El aplicador más utilizado fue el tipo Fletcher. Para la planificación se realizó tomografía. Se empleó dosimetría 3D y planificación inversa. Se utilizó el equipo Flexitron, con fuente de cobalto 60 de alta intensidad 2 Ci.
Fuente donde aparece publicado:	Google Scholar	Resultados:	Predominó el estadio IIB (182) seguido del estadio IIIB (99). En 63,8 % de las pacientes se empleó radioterapia externa con planificación conformada 3D. La mediana de dosis total de radioterapia a la pelvis fue 45 Gy. El esquema más utilizado fue el de 2 implantes (9-10 Gy) en 66,6 % de las pacientes (28). La mediana de dosis total osciló 81,5-85,6 Gy. 66 pacientes (15,49 %) recibieron la radioterapia y braquiterapia en menos de 8 semanas. Promedio de seguimiento fue 10,5 meses, con una mediana de 8,5 meses. El 71,36 % de las pacientes estaban vivas sin enfermedad. La sobrevida global fue 77,1 % y la sobrevida causa específica 78,8 %, a los 2 años.
Autores:	Urdaneta, Nelson; Reyes, Rosario; Abreu, Perfecto; Aguirre, Laura; Rodríguez, Héctor; Lira, Luis; Vera, Andrés; Villegas, María G; Barboza, Doris; Hernández, Carlos; D'anna, Eneimar	Conclusiones:	La braquiterapia es fundamental en el tratamiento radiante del cáncer de cuello uterino es posible la aplicación de esta nueva tecnología de nuestro medio. El desarrollo de la BTGI3D representa un cambio de paradigma en BT ginecológica. El presente estudio se demuestra que es posible la aplicación de esta nueva tecnología de BTGI3D en nuestro medio, a pesar de la crisis en el sector salud en este país. En la actualidad están comenzando a utilizar la RM de rutina para la planificación de la BT y se espera mejorar la técnica en el futuro para incluir la BT intersticial en las pacientes con enfermedad localmente avanzada.
Año de publicación:	2024	Limitaciones:	En la planificación de la BTGI3D en este servicio se ha utilizado básicamente la TC ya que no se disponía de equipos de RM en la institución hospitalaria.
País:	Venezuela	Recomendaciones:	No reportadas.
Enlace o link:	https://revista.oncologia.org.ve/wp-content/uploads/2025/01/03.-Urdaneta-N-16-36.pdf		

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Estudio 2

Título:	Braquiterapia de alta tasa de dosis de aplicación única multifraccionada guiada por imágenes para el cáncer cervical: resultados clínicos y dosimétricos	Instrumentos/técnicas/procedimientos realizados:	Estudio prospectivo con el objetivo de evaluar si la braquiterapia adaptativa guiada por imágenes (IGABT), aplicada en una sola inserción y en varias fracciones con alta tasa de dosis (HDR), era viable y segura para tratar el cáncer cervical. Participaron 38 pacientes diagnosticadas con enfermedad en estadio IIB a IVA, según la clasificación FIGO 2009, estas pacientes fueron reclutadas entre 2017 y 2019. Luego de recibir radioterapia externa de 50 Gy en 25 sesiones, las pacientes fueron tratadas con IGABT basada en resonancia magnética. El protocolo de IGABT consistió en una sola aplicación de braquiterapia (BT) y tratamiento con 3 fracciones de HDR (9 Gy el día 1; 2 fracciones de 7 Gy con un intervalo mínimo de 6 horas el día 2). Para que el tratamiento fuese aceptable se debía lograr que el volumen objetivo clínico de alto riesgo (HRCTV) recibiera más de 84 Gy, mientras que el volumen de 2 cm ³ de vejiga y recto/sigmoides no debía superar los 85 Gy y 71 Gy respectivamente. Para controlar la variabilidad entre las fracciones, el segundo día se realizó una planificación adicional con tomografía computarizada, usando un sistema de registro por coordenadas basado en información mutua. Además, se delimitaron los órganos en riesgo con tomografía computarizada y se ajustaron las dosis en algunos casos.
Fuente donde aparece publicado:	Google Scholar, Pubmed, Science Direct, International Atomic Energy Agency (IAEA), International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics.	Resultados:	A todos los pacientes se les aplicó braquiterapia combinada (intracavitaria e intersticial). La media desviación estándar del volumen objetivo clínico de alto riesgo (HRCTV) fue de 41 ± 21 cm ³ y la dosis media que recibió el 90 % del HRCTV (D90) fue de 87, 2 Gy ± 3,6 Gy. Seis pacientes necesitaron ajustes en la planificación antes de recibir una segunda fracción del tratamiento. En promedio, el tratamiento duró 47 días, con una variación de 6 días aproximadamente. Al cabo de un seguimiento de 22 meses con un rango de 2 a 37 meses, se observó un control local del 90,1 %, una supervivencia libre de enfermedad del 85 % y una supervivencia global del 94,5 % a los dos años. Para ese momento se reportaron efectos secundarios en el recto en tres pacientes: uno con toxicidad de grado II y dos con toxicidad de grado III.
Autores:	Mahantshetty, Umesh; Gurrām, Lavanya; Bushra, Sabheen; Ghadi, Yogesh; Aravindakshan, Dheera; Paul, John; Hande, Vinod; Pilar, Avinash; Chopra, Supriya; Ghosh, Joya; Shylasree; Popat, Palak; Sable, Niles; Maheswari, Amita; Gupta, Sudeep	Conclusiones:	Las técnicas empleadas en este estudio tienen el alcance para facilitar la aplicación de la braquiterapia (BT) y hacerla más aceptada por los pacientes, adicionalmente representan un uso más eficiente y ahorrrativo de los recursos, sin comprometer el control de la enfermedad ni aumentar los efectos secundarios. La braquiterapia guiada por resonancia magnética con una aplicación única fraccionada resultó factible en el 95 % de los casos, los datos dosimétricos y los resultados clínicos obtenidos son alentadores.
Año de publicación:	2021	Limitaciones:	Inicialmente se habían elegido 41 pacientes para este estudio, de las cuales una se retiró luego de 12 fracciones de EBRT y 2 no alcanzaron las restricciones estrictas definidas de HRCTV D90, vejiga 2 cm ³ y recto 2 cm ³ en la primera fracción planificada de la radioterapia externa; por lo tanto, el tratamiento se consideró inviable. Debido a esto se presentan únicamente los resultados de 38 pacientes.
País:	India	Recomendaciones:	No reportadas.
Enlace o link:	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036030162100732X		

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Estudio 3

Título:	Planificación interactiva del tratamiento de braquiterapia de alta tasa de dosis para cáncer ginecológico.	Instrumentos/técnicas/procedimientos realizados:	Se planteó un problema de optimización con el objetivo de reducir la cantidad de radiación recibida en los órganos sanos y dar la suficiente radiación al tumor. Se desarrolló una interfaz de usuario que permite al usuario ajustar los pesos de los órganos. Con un simple clic del mouse, el problema de optimización se resuelve en segundos con un método de dirección alternada de multiplicadores altamente eficiente y una estrategia de optimización de inicio en caliente. Los D2cc clínicamente relevantes resultantes de los órganos se muestran inmediatamente. Esto permite al usuario ajustar intuitivamente los planes con una calidad satisfactoria.
Fuente donde aparece publicado:	Mathews Open Access Journals, Research Gate, Semantic Scholar, Google Scholar	Resultados:	Los resultados del plan de optimización y el plan clínicamente aprobado para el "paciente A" se puede ver que las dosis al sigmoide, recto e intestino delgado en el plan de optimización mejoran mucho, mientras que la dosis a la vejiga es ligeramente superior, con valores D90 idénticos para el control de volumen tumoral (CTV). Se puede ver que los valores del Histograma dosis-volumen (DVH) comienzan a disminuir más rápido utilizando el plan de optimización. Los resultados del plan de optimización y el plan clínicamente aprobado para el "paciente B" podemos ver que todas las dosis de OAR utilizando el plan de optimización son menores que las del plan clínicamente aprobado.
Autores:	Liu, Huan; Ma, Chang M; Jia, Xun; Shen, Chenyang; Klages, Peter; Albuquerque, Kevin	Conclusiones:	Las técnicas empleadas en este estudio tienen el alcance para facilitar la aplicación de la braquiterapia (BT) y hacerla más aceptada por los pacientes, adicionalmente representan un uso más eficiente y ahorativo de los recursos, sin comprometer el control de la enfermedad ni aumentar los efectos secundarios. La braquiterapia guiada por resonancia magnética con una aplicación única fraccionada resultó factible en el 95 % de los casos, los datos dosimétricos y los resultados clínicos obtenidos son alentadores.
Año de publicación:	2021	Limitaciones:	A pesar de que los ajustes realizados con las herramientas interactivas simples dentro del sistema de planificación del tratamiento con tiempos inferiores a 10 minutos, esto no aseguraba que los planes resultantes fueran óptimos. Por ende, habría que ajustar nuevamente los datos hasta conseguir una planificación óptima.
País:	Estados Unidos de América	Recomendaciones:	Para lograr una velocidad de optimización más rápida, se puede emplear la computación paralela. La computación paralela acelera el procesamiento al dividir tareas complejas en partes más pequeñas que se ejecutan simultáneamente en los múltiples núcleos o hilos de una computadora.
Enlace o link:	https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.05081		

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Estudio 4

<p>Título:</p>	<p>Braquiterapia 3D guiada por la imagen.</p>	<p>Instrumentos/técnicas/procedimientos realizados:</p>	<p>La braquiterapia vaginal profiláctica postoperatoria (BTV) es el principal tratamiento para el cáncer de endometrio postoperatorio. La planificación de la radioterapia postoperatoria se basa mayormente en imágenes 3D de tomografía computarizada (TC), para definir áreas de tratamiento y dosis. En el software de planificación, se identifican los órganos a riesgo (OAR), el volumen tumoral y la simulación de la fuente. En cuanto al cáncer de vulva se utiliza la técnica de imagen de TC para la planificación, identificando los catéteres implantados, se procede a dibujar los contornos de los órganos a riesgo y del tumor visible o del volumen clínico en casos de cirugía previa, utilizando información clínica en el quirófano y las marcas fiduciales si las hay. Para el cáncer de cérvix, en caso de no contar con la resonancia magnética (RM), se emplea la técnica helicoidal de la TC, con cortes axiales y un espaciado de corte de 1,5-2,5 mm, para lograr una visualización óptima. Por otro lado, la ecografía transvaginal se utiliza para evaluar la respuesta de la radioterapia externa antes de la braquiterapia, mientras que la ecografía abdominal, gracias a su amplio campo de visión permite planificar el tratamiento al visualizar el útero y el aplicador en su totalidad. Para el cáncer de vagina la RM permite la visualización de la lesión tumoral, específicamente en la secuencia T2, integrando marcas fiduciales que permiten con mayor facilidad los límites de la lesión. En el caso del cáncer de endometrio inoperable se utiliza como técnica de imagen la RM debido a la información sobre la morfología que esta ofrece, como el tamaño del útero. La secuencia de adquisición utilizada para este tipo de cáncer es la secuencia T2, en los planos axial, sagital y coronal. Para el cáncer de cérvix se utiliza de igual forma la resonancia magnética, la adquisición en la cual se obtienen las imágenes es en secuencia T2, la cual es utilizada para obtener imágenes detalladas de los tejidos, siendo esta secuencia la más adecuada tanto para la delimitación precisa de las estructuras como para la reconstrucción. Las imágenes resultantes se presentan en planos paraxiales, parasagittales y paracorales, en relación con el aplicador utilizado.</p>
<p>Fuente donde aparece publicado:</p>	<p>Sociedad Española de Oncología Radioterápica (SEOR)</p>	<p>Resultados:</p>	<p>Para la braquiterapia se utilizan diversas técnicas de imagen. La resonancia magnética se considera la técnica de preferencia debido a su alta precisión en la visualización del tumor y los tejidos circundantes. Sin embargo, dependiendo de las circunstancias se pueden utilizar diversas técnicas de imagen, ya sea la tomografía computarizada o la resonancia magnética. También se aconseja la utilización de las tecnologías de imagen combinadas, agrupando las fortalezas de la tomografía computarizada y la resonancia magnética, obteniendo así información más precisa.</p>
<p>Autores:</p>	<p>Rovirosa, Ángels; Samper, Pilar; Villafranca, Elena</p>	<p>Conclusiones:</p>	<p>La resonancia magnética se considera la técnica de imagen más precisa para la braquiterapia, ya que proporciona información detallada sobre la extensión del tumor, sus patrones de crecimiento y su ubicación tridimensional, tanto para el diagnóstico inicial como para la evaluación de la respuesta al tratamiento y la planificación de la braquiterapia. Sin embargo, en comparación con la RM, la tomografía computarizada es más accesible y, por lo tanto, es frecuentemente más utilizada en la planificación de la braquiterapia. por otra parte, la incorporación de la ecografía, durante la inserción del aplicador y en la planificación del tratamiento, ha demostrado ser una alternativa valiosa en países con recursos limitados.</p>
<p>Año de publicación:</p>	<p>2022</p>	<p>Limitaciones:</p>	<p>No Reportadas.</p>

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Pais:	España	Recomendaciones:	Se recomienda el uso de la resonancia magnética para elegir el aplicador adecuado según la extensión tumoral. Otra recomendación es la adquisición de imágenes en resonancia magnética en un ángulo perpendicular ya sea en orientación con relación al aplicador o en relación con la vagina. por último, se recomienda la fusión de las técnicas de imagen de resonancia magnética y la tomografía computarizada.
Enlace o link:	https://seor.es/wp-content/uploads/2023/01/AAFF_Braquiterapia_li_bro.pdf		

Estudio 5

Título:	Braquiterapia adaptativa guiada por resonancia magnética para el cáncer cervical localmente avanzado: Experiencia del Hospital Carlos Van Buren	Instrumentos/técnicas/procedimientos realizados:	El estudio se llevó a cabo con la participación de 34 pacientes diagnosticadas con cáncer cervical localmente avanzado, las cuales fueron tratadas con radioquimioterapia concomitante, seguida de braquiterapia adaptativa guiada por resonancia magnética (BTAGI), entre mayo de 2019 y marzo de 2020. La braquiterapia de alta tasa de dosis se aplicó utilizando la técnica de "remote afterloading". Para la planificación del tratamiento se empleó el sistema BrachyVision (versión 13.6).
Fuente donde aparece publicado:	Google Scholar, SciElo Chile, Dialnet, Research Gate	Resultados:	Se observó la disminución del tamaño tumoral entre el momento del diagnóstico, hasta la realización de la braquiterapia (BT) en un grupo de 34 pacientes, de las cuales 24 fueron tratadas con 3 sesiones de BT. En todos los casos se alcanzaron dosis equivalentes superiores a 80 Gy. En 12 pacientes se visualizó una reducción tumoral mayor del 70 % y solo una paciente experimentó toxicidad gastrointestinal de grado 3 o superior.
Autores:	Solis, J A; Olivares, J; Tudela, B; Veillon, G; Perrot, I; Lazcano, G	Conclusiones:	El tratamiento de preferencia para el cáncer cervical localmente avanzado es la combinación de la radioquimioterapia concomitante con la braquiterapia adaptativa guiada por resonancia magnética. Esta técnica de imagen es clave, ya que permite una visualización precisa del tumor desde distintos ángulos, facilitando así una planificación más específica del tratamiento. En el Hospital Carlos Van Buren se logró implementar exitosamente el protocolo de BTAGI, cumpliendo con los estándares clínicos internacionales y demostrando que es viable dentro de un contexto hospitalario público.
Año de publicación:	2020	Limitaciones:	No se logra definir una relación directa entre la dosis equivalente y la reducción tumoral debido a la falta de suficiente muestra estadística.
Pais:	Chile	Recomendaciones:	Los autores señalan que la braquiterapia guiada por resonancia magnética puede ser aplicable en hospitales del sistema público, permitiendo evaluar con precisión la disminución del tumor.
Enlace o link:	http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75262020000600604		

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Tabla 2.

Tabla de análisis de datos.

				D90: los valores son casi idénticos para el plan clínico y el plan de optimización.	(Resonancia Magnética)	pacientes, comparándolos con el plan clínicamente aprobado; se obtuvo un D2cc menor de los órganos a riesgo (OAR), además de mantener en valores casi idénticos el DHV.
4	Braquiterapia 3D guiada por imágenes	Cáncer de endometrio Cáncer de cérvix Cáncer de vagina Cáncer de vulva	Braquiterapia 3D guiada por imágenes	<p>Indicadores de grado de cobertura D2cc: dosis recibidas en 2 centímetros cúbicos, midiendo la dosis recibida en los órganos en riesgo. D90: 90% del volumen de interés.</p> <p>En el cáncer de endometrio, los resultados de tratamientos con baja y alta tasa de dosis son similares, con una supervivencia global a 5 años del 41-73 % y una supervivencia específica de la enfermedad del 64-88 %. De manera general, las tasas de supervivencia observadas para los distintos estadios del cáncer son las siguientes: 86 % para el estadio IA, 68 % para el IB, 60 % para el II, 44 % para el III y 14 % para el IVA.</p> <p>Para el cáncer de vulva la probabilidad de supervivencia general se sitúa alrededor del 46 %, pero este porcentaje cambia significativamente, oscilando entre un 19 % y un 94 %, según la etapa en la que se encuentre el tumor. La supervivencia global a 5 años según el estadio es: 90,45 % en el estadio I, 77 % en el estadio II, 51,3 en el estadio III, 18 % en el estadio IV.</p>	Resonancia Magnética y Tomografía Computarizada	<p>Se indica la utilización de TC para el cáncer de endometrio postoperatorio, la cual se utiliza para definir las áreas del tratamiento y calcular la dosis de radiación. De igual manera, para el cáncer de vulva, se sugiere la utilización de la TC para el contorneo de los órganos a riesgo, volumen tumoral macroscópico o volumen tumoral clínico en caso la realización de una cirugía previa. En cuanto a la RM para la planificación de la braquiterapia, es la técnica de imagen recomendada tanto para cáncer de endometrio inoperable como también para el cáncer de cérvix, debido a la visualización de tejidos que esta presenta. Con esta técnica de imagen se define la extensión tumoral y los órganos a riesgo, también permite ver la morfología y tamaño del útero además de definir los límites entre el final del cérvix y el inicio del endometrio. Por su parte, en el cáncer de vagina también se sugiere la utilización de la RM debido a su capacidad de delimitar los órganos a riesgo y el volumen tumoral. Además, debido a los posibles cambios en los hallazgos durante las exploraciones, producto de deformaciones causadas por el aplicador se implementa la</p>

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

						utilización de marcas fiduciales para definir los límites de la lesión. A pesar de los beneficios de la RM, no es considerada la técnica estándar para la planificación del cáncer de endometrio postoperatorio, por su poco uso en las instalaciones.
5	Braquiterapia adaptativa guiada por resonancia magnética para el cáncer cervical localmente avanzado: Experiencia del Hospital Carlos Van Buren	Cáncer cervical	Braquiterapia adaptativa guiada por imágenes	Se logró una reducción tumoral en las 34 pacientes. 12 pacientes presentaron disminución tumoral mayor del 70 % Una cantidad mínima de pacientes presentaron toxicidad aguda gastrointestinal y/o genitourinaria en días siguientes a la culminación del tratamiento y solo una de ellas fue de gravedad alta. La dosis no se puede aumentar demasiado en áreas donde existan restos de tumor, debido al daño que se le puede ocasionar a los órganos cercanos en riesgo.	Resonancia Magnética y Tomografía Computarizada	La RM permite observar de manera clara el tumor cervical, por lo tanto, esta técnica es importante para definir el volumen tumoral.

Papel de la imagenología dentro del procedimiento de la braquiterapia de alta tasa de dosis (en

esta parte se anotarán las partes del procedimiento dónde y cómo se involucra la imagenología, en base a lo descrito en los estudios):

Estudio 1: en el estudio 1, las tecnologías de imagen en la braquiterapia útero vaginal, entran en acción durante el implante de la fuente de radiación por medio de ultrasonido transabdominal (UST) y posteriormente para la delimitación de los volúmenes blanco y de los órganos de riesgo (OAR) en un estudio con tomografía computarizada (TC).

Se coloca el tándem intrauterino y se insertan los aplicadores vaginales con la guía de un UST. Luego se emplea nuevamente para verificar la posición del tándem en la cavidad uterino, en caso de que se haya desplazado. Luego se realiza una TC para comprobar la posición correcta del aplicador. Estas imágenes se transfieren al sistema de planificación de tratamiento donde se trazan los contornos de los volúmenes blancos (CTV HR) que incluye todo el cuello uterino, y el volumen macroscópico residual en el momento de la BT (GTV-B) que incluye el tumor residual después de la

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico
radioterapia externa o quimioterapia, y por último el CTV IR (clinical tumor volumen immediate risk) que incluye el CTV HR con un margen de seguridad de 10 mm.

Estudio 2: en el estudio 2, las técnicas de imagen utilizadas fueron pieza clave en distintas etapas del tratamiento, inicialmente se les realizó a los pacientes una resonancia magnética (RM) para definir el CTVHR y los OAR, posteriormente para las siguientes aplicaciones de braquiterapia se realizaron imágenes de tomografía computarizada (TC) para identificar el posible movimiento de estructuras anatómicas o del aplicador. Las imágenes de TC fueron comparadas con la imagen inicial de la RM utilizando como punto de referencia al aplicador, con esto se logró una precisión de 1mm. Esta comparación o alineación de las imágenes permitió la proyección de los OAR en la TC sobre la RM y se requirió reajustar el tratamiento únicamente en 6 de los 38 pacientes.

Estudio 3: en el estudio 3 se realizó un plan de optimización mediante la interfaz de optimización interactiva (IOI). Una vez terminado mediante la herramienta DICOMRT se transfieren los datos a una herramienta para la planificación de braquiterapia llamada BrachyVision, este utiliza imágenes 3D para el desarrollo del plan; el cual utilizó las imágenes de Resonancia Magnética previamente realizadas que fueron utilizadas para el plan clínico aprobado y así poder comparar los resultados obtenidos con IOI.

Estudio 4: en el estudio 4 se recomienda la utilización de la tomografía computarizada para el de cáncer de endometrio postoperatorio. Esta técnica de imagen es utilizada para la planificación de dosis de las áreas a tratar y también para la simulación de las fuentes de radiación, facilitando la reconstrucción del implante en el planificador. Luego, en el software de planificación se contornean los órganos a riesgo y el volumen de tratamiento clínico (CTV). En el caso del cáncer de vulva también se orienta a utilizar la tomografía computarizada para la realización de la braquiterapia, la técnica empleada para la braquiterapia consiste en un implante intersticial utilizando agujas o tubos plásticos. Primeramente, se marca la piel en el área a tratar y la trayectoria de las agujas, pudiendo colocarse marcas fiduciales para facilitar el contorneo de los volúmenes en la planeación con tomografía computarizada. Se insertan las agujas paralelas siguiendo el sistema de París luego

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

reemplazadas por catéteres de plásticos fijados a la piel. Opcionalmente, se usa un cilindro vaginal para complementar la dosis o proteger la mucosa vaginal. Previo a la realización de la planificación con la técnica de imagen mencionada, se colocan fuentes simuladas para realizar los cortes con el mínimo espesor posible alrededor de 2-3 mm con el fin de una mayor precisión a la hora de colocar las fuentes simuladas.

La utilización de las técnicas imagenológicas durante la braquiterapia de cáncer de endometrio inoperable comienza al realizar una tomografía computarizada (TC) antes de la resonancia magnética (RM) para tener la certeza de colocar el implante en la posición correcta, además de utilizar la resonancia magnética para ver la extensión tumoral macroscópica (GTV) y los órganos a riesgo (OAR). En cuanto a las técnicas imagenológicas durante la braquiterapia de cáncer de cérvix empiezan su integración midiendo la extensión tumoral macroscópica (GTV) y órganos a riesgo mediante una resonancia magnética antes de la inserción del aplicador. Una vez colocado el aplicador de manera cuidadosa en la posición correcta dentro de la paciente, se realiza una resonancia magnética para su reconstrucción y nuevamente se realiza una medición de la extensión tumoral macroscópica (GTV), en esta imagen también se puede observar el tumor, órganos a riesgo y cualquier necesidad que requiera el oncólogo radiólogo. Cabe mencionar que antes de la realización de la braquiterapia se recomienda una adquisición de imagen de resonancia magnética para escoger el aplicador adecuado para la paciente. En el cáncer de vagina, las técnicas imagenológicas durante la braquiterapia comienzan a integrarse midiendo la extensión tumoral macroscópica (CTV) y órganos a riesgo mediante una Resonancia Magnética antes de la inserción del aplicador. Para este tratamiento se integran marcas fiduciales en la imagen de resonancia magnética para delimitar con más precisión la lesión, debido a posibles deformaciones en la exploración provocadas por el aplicador.

Estudio 5: en el tratamiento de la braquiterapia de alta tasa de dosis para el cáncer cervical localmente avanzado, la imagenología juega un rol importante desde la introducción de la resonancia magnética (RM) previa al tratamiento para evaluar el tumor y los órganos en riesgo.

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Antes de administrarle radiación a los pacientes con el tratamiento de braquiterapia se les realizó a cada uno de ellos una RM en secuencias T2 para observar la extensión del tumor y su relación con las regiones cercanas que se encuentran en buen estado, esta evaluación es importante para determinar el volumen clínico a tratar y para estructurar un plan de cómo será la colocación del aplicador. En la primera sesión de Braquiterapia se llevó a cabo una tomografía computarizada con el fin de evaluar la adecuada colocación del aplicador o tándem, además se realizó una RM adicional para evaluar la existencia de pequeños porcentajes de células cancerosas con el aplicador ya colocado. Los volúmenes objetivos CTV-HR (High risk clinical target volume) que es el área propensa a la reaparición de cáncer, porque aún existe tumor visible, es decir el cuello uterino y el CTV-IR (Intermediate risk clinical target volume) que es el área donde puede existir un tumor no visible, fueron identificados en la primera aplicación de braquiterapia y en el diagnóstico respectivamente.

Técnica imagenológica utilizada con mayor frecuencia en braquiterapia de alta tasa de dosis para cáncer ginecológico (en esta parte se anotarán las tecnologías utilizadas en los estudios y los motivos, para luego identificar la que se utilizó con mayor frecuencia).

Estudio 1: se utilizó la TC ya que no disponían de equipos de RM en la institución hospitalaria. Para el trazado de los contornos la TC al igual que la RM son métodos adecuados para la determinación de los OAR (órganos a riesgo), sin embargo, la delimitación de los volúmenes blanco en la TC puede sobrestimar la dimensión transversal del tumor y por tanto el volumen tratado en comparación con la RM. Por lo que, posteriormente, al adquirir una unidad de RM han comenzado a utilizar esta modalidad de imagen para la planificación de la BT.

Estudio 2: se utilizaron 2 técnicas imagenológicas la RM y la TC. La RM fue útil para la planificación inicial de la primera fracción debido a su alta resolución de tejidos blandos, por otro lado, la TC se utilizó en las fracciones posteriores para verificar la posición del aplicador y evaluar posibles desplazamientos anatómicos, mediante el registro rígido de imágenes con la RM inicial.

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Estudio 3: la técnica de imagen utilizada fue la resonancia magnética, debido a su precisión anatómica y contraste de los tejidos blandos. Se realizó la planificación de la braquiterapia con BrachyVision, el cual utilizó la imagen de resonancia magnética para realizar la planificación de la braquiterapia, también es compatible con las distintas técnicas de imagen. Para el tratamiento de cánceres ginecológicos la técnica de imagen utilizada por elección es la resonancia magnética, debido a su precisión anatómica, su imagen de alta resolución y contraste de tejidos blandos.

Estudio 4: en el estudio 4 se insta el uso de tomografía computarizada para el cáncer de endometrio postoperatorio. Con las imágenes proporcionadas por esta técnica de imagen, se contornean los órganos a riesgo, el volumen clínico tumoral y se realiza la dosimetría del tratamiento. También se realiza la reconstrucción del implante mediante fuentes simuladas. En el cáncer de vulva antes del procedimiento se realiza una simulación del tratamiento con fuentes simuladas, y se sugiere el uso de la Tomografía Computarizada para la planificación, la delimitación de los órganos a riesgo (OAR), el volumen tumoral macroscópico (GTV) o el volumen de tratamiento clínico (CTV) en caso de haber una cirugía previa.

La resonancia magnética (RM) es la técnica de elección tanto para el cáncer de endometrio inoperable, el cáncer de cérvix y el cáncer de vagina, debido a su precisión en la detección de variaciones en los tejidos, siendo de gran importancia en la delimitación de los órganos a riesgo (OAR) y la extensión tumoral. En cuanto a el cáncer de vagina, primeramente, se realiza un topograma de la vagina para tener una referencia visual sobre la extensión del tumor y los límites de este. Si bien, para el uso de la resonancia magnética, los marcadores convencionales de radiología no son compatibles, por ello no se permite la visualización de la trayectoria de la fuente radiactiva. Para esto se ha desarrollado marcadores específicos para la resonancia magnética, los marcadores son catéteres que contienen diversos materiales, los cuales se insertan en los canales de los aplicadores plásticos, permitiendo la visibilidad necesaria de la trayectoria de la fuente. En cuanto al cáncer de vagina la deformación del aplicador puede cambiar lo que se ve en la exploración, por lo que se utilizan marcas fiduciales visibles en la resonancia magnética para ayudar a delimitar la lesión.

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Estudio 5: se utilizó la RM ya que se considera la técnica de imagen esencial para determinar el volumen tumoral en el cáncer cervical localmente avanzado, esta proporciona una imagen detallada del tumor en diversos planos lo que permite establecer con mayor claridad y precisión los volúmenes objetivos para planificar adecuadamente el tratamiento de la braquiterapia adaptativa guiada por imágenes.

Discusión

Nuevas tecnologías de aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis

La braquiterapia es un tratamiento que se utiliza para erradicar tumores en cualquier parte del cuerpo y se suele utilizar en conjunto con otras técnicas como la radioterapia externa, quimioterapia o cirugía, o inclusive se puede utilizar como tratamiento paliativo. Con el paso del tiempo se han introducido nuevas técnicas para potenciar el tratamiento, como la braquiterapia guiada por imagen 3D, donde se incorporan las tecnologías de imagen para guiar la colocación de los aplicadores (5). Esta técnica fue utilizada en la mayoría de los estudios consultados, pero cada uno con ligeras variaciones.

En el caso del estudio 1, se utilizó la braquiterapia guiada por imágenes con planificación 3D (BTGI3D) y técnica adaptativa con volúmenes blanco modificados por la respuesta del tumor al tratamiento. Los autores señalaban que diversos estudios reportaron una mejoría en la sobrevida en las pacientes tratadas con BTGI3D comparada con BT (braquiterapia) convencional. Además, mencionaron que a pesar de la crisis de salud que enfrentan en Venezuela, se hizo posible la aplicación de esta técnica, con ligeras adaptaciones como pasar de un régimen de 4 implantes úterovaginales de 7 Gy a 2 implantes con una dosis de 9 a 10 Gy, con una semana de intervalo, esto debido al elevado número de pacientes atendidos.

En este estudio al igual que en el estudio 5 se menciona la utilización de la braquiterapia 3D. Esta es una técnica sencilla que brinda resultados alentadores a los pacientes, sus imágenes se basan en la tomografía computarizada y/o resonancia magnética. En la braquiterapia 3D las dosis se prescriben a volúmenes, en lugar de utilizar puntos de referencias (7).

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Algunos de los conceptos empleados en este estudio a modo de criterios de validación son la sobrevida global (SG), sobrevida causa específica (SCE) y toxicidades agudas y crónicas. El diccionario médico de la Clínica Universidad de Navarra (8) indica que estos son conocidos como indicadores de los resultados clínicos y de la eficacia de las intervenciones médicas y que la SG representa el porcentaje de pacientes vivos cinco años después del inicio del tratamiento. La SCE o supervivencia por causa específica brinda información sobre la causa de muerte, ya que en esta medida no se incluyen los pacientes que mueren por otras causas no relacionadas con la enfermedad (9.). Se reportaron cifras de SG de 77,1 % y SCE de 78,8 %, las cuales representan cifras alentadoras. Las complicaciones agudas por la braquiterapia son descritas como leves, en la mayoría de los casos, disuria.

Para el estudio 2 se utilizó igualmente la braquiterapia de alta tasa de dosis guiada por imágenes, pero con la utilización de la tecnología de aplicación única multifraccionada, la cual es definida por Chopra et al. (10), como una modalidad del tratamiento de braquiterapia en la que la dosis total de radiación se entrega en corta duración de tiempo y en varias sesiones sin necesidad de retirar el aplicador de la paciente. En este estudio fue administrada la braquiterapia de aplicación única multifraccionada como un complemento de la radioterapia externa, la duración del tratamiento de braquiterapia fue de 48 horas, divididas en 3 sesiones o fracciones (una fracción de 9 Gy el día 1 y 2 fracciones de 7 Gy con un espacio de tiempo entre ambas de al menos 6 horas el día 2), para cumplir este objetivo las pacientes permanecieron una noche en el centro hospitalario, el resultado fue alentador con una respuesta positiva en el 95 % de las pacientes.

De acuerdo con los autores, los resultados indican que la braquiterapia de alta tasa de dosis guiada por imágenes dividida en sesiones sin retirar el aplicador entre ellas, es viable en centros médicos que puedan administrar dosis mayores a 85Gy al volumen objetivo clínico de alto riesgo (HRCTV) porque es aquí donde puede volver a surgir la aparición del cáncer según Bandyopadhyay et al. (11), es por ello que se necesitan estas dosis mayores para desaparecer por completo el tumor. Además, se encontró que, si el tiempo total del tratamiento supera las 7 semanas (es decir se extiende

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

a una octava semana el tratamiento) se necesitará una dosis adicional de 5Gy al 90 % del HRCTV, para mantener la eficacia del tratamiento.

Por otro lado, los criterios de validación en este estudio 2 coinciden con algunos de los empleados en el estudio 1. Mencionan que la supervivencia libre de enfermedad (SLE), que se puede definir como el tiempo en el que un paciente sobrevive sin signos de enfermedad posterior al tratamiento (12), fue de un 85 %. De igual manera indican que la supervivencia global (SG) fue de un 94,5 %. Lo cual es positivo ya que representa una supervivencia posterior al tratamiento de la gran mayoría de los pacientes, las cifras de SG del estudio 2 resultaron superiores a las cifras demostradas por el estudio 1, ambos estudios incluyeron pacientes con estadios que presentan un mayor avance del cáncer, sin embargo, las dosis administradas en el estudio 2 fueron superiores en comparación a las del estudio 1, estas variaciones pudieron haber influido en las cifras de SG.

En el estudio 3, la planificación en la braquiterapia guiada por imágenes se realiza utilizando una interfaz de optimización interactiva (IOI). El cual permite al usuario modificar los parámetros del tratamiento mediante una herramienta gráfica, que emplea algoritmos de optimización y controles interactivos, asegurando que el tumor reciba la dosis adecuada y minimizar la exposición de los órganos a riesgo. Una vez se obtuvo un plan satisfactorio con la interfaz de optimización interactiva (IOI) se compara con los valores del plan clínicamente aprobado, transfiriendo los datos obtenidos a BrachyVision mediante datos DICOM RT. Según Law et al. (13) DICOM RT es un standard que facilita la integración e intercambio eficiente de datos entre distintos equipos y sistemas de radioterapia, optimizando el flujo de trabajo. También permite el uso de imágenes diagnósticas DICOM en los procesos de radioterapia. Por otro lado, BrachyVision es un *software* de planificación utilizado para los tratamientos de Braquiterapia HDR y la Braquiterapia de Baja Tasa de Dosis (LDR), empleando imágenes de TC y RM para una planificación precisa. BrachyVision ha evolucionado continuamente desde sus inicios, consolidándose como un sistema de planificación versátil con una amplia trayectoria (14).

En el estudio 4 se aplicó la braquiterapia guiada por imágenes, donde las técnicas de imagen recomendadas fueron la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM). Para el

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

cáncer de endometrio postoperatorio, se aconseja la utilización de la braquiterapia guiada por imágenes con el uso de la TC. Los autores señalan diferentes esquemas de dosis propuesto por distintos para braquiterapia exclusiva (4-5 Gy en 6 fracciones, 4-5 Gy en 4 fracciones, 6 Gy en 3 fracciones) todos mostrando resultados similares, tanto en el control local del cáncer como en las complicaciones asociadas.

Para el cáncer de vulva, se sugiere la braquiterapia guiada por imágenes de TC, similar al mencionado anteriormente. La tasa de supervivencia en este tipo de cáncer presente una gran variabilidad que va en un rango entre el 19 % y el 94 % con un promedio aproximado de 46 %. La supervivencia global a 5 años se distribuye según la etapa del cáncer en: 90,45 % en el estadio I, 77 % en el estadio II, 51,3 en el estadio III, 18 % en el estadio IV.

En cuanto al cáncer de cérvix, se recomienda el uso de la braquiterapia guiada por imágenes de RM. Tras un seguimiento promedio de 51 meses por varias organizaciones reportaron los siguientes resultados en todos los estadios: 92 % en el control local global, 87 % en el control pélvico, 87 % en el control ganglionar, 68 % en la supervivencia libre de enfermedad y 74 % en la supervivencia global.

Por otro lado, para el cáncer de vagina se implementa la braquiterapia guiada por imágenes de RM para la planificación detallada del tratamiento. Sin embargo, primero se utiliza la TC para la realización de un topograma, previo al tratamiento. Es importante destacar que no hay dosis ni fraccionamiento estándar para este tratamiento, por lo tanto, se basan en la braquiterapia de baja tasa (LDR). La Sociedad Americana de Braquiterapia (ABS) sugiere varias opciones de esquemas bastantes variados para la braquiterapia intersticial de vagina cuando se combina con radioterapia externa, ofreciendo dosis totales al volumen tumoral objetivo que oscilan entre 72,9 Gy y 81,5 Gy.

Con respecto al cáncer de endometrio inoperable, se lleva a cabo la braquiterapia guiada con planificación 3D con la técnica de imagen de resonancia magnética. En este tipo de cáncer la supervivencia global a 5 años (41-73 %) y la supervivencia específica (64-68 %) son similares entre los tratamientos de baja y alta tasa de dosis. Las probabilidades de supervivencia varían según la etapa

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

de la enfermedad: 86 % en estadio IA, 68 % en el estadio IB, 60 % en el estadio II, 44 % en el estadio III y 14 % en el estadio IVA.

En cuanto al estudio 5 en este se utilizó la braquiterapia adaptativa guiada por imágenes. Los autores señalan que varios estudios demostraron que el uso de la braquiterapia guiada por resonancia magnética se asoció con un aumento en la tasa de control local, la cual representa la ausencia de células cancerosas o residuos de estas en cualquier parte del cuerpo según Chopra et al. (10), este control fue observado 3 años después en un aproximado del 71 % al 90 %, en tumores que al momento del diagnóstico eran mayores de 5 cm. y se reportó una disminución importante en las toxicidades tardías digestivas y urinarias grado 3-4. De igual manera estos estudios señalan que la braquiterapia 3D adaptada por resonancia magnética aumenta la sobrevida al 79 % y disminuye las toxicidades tardías en más del 50 %.

En este estudio al igual que en otros hacen referencia a la braquiterapia adaptativa guiada por imágenes, sin embargo, esto sería lo mismo que la braquiterapia guiada por imágenes, que es la realización del tratamiento de braquiterapia con apoyo o ayuda de técnicas imagenológicas como la TC y la RM (15, párr.8-13).

Para aplicar la braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR) en el estudio 5 se utilizó la técnica de “remote afterloading”, este es un método que puede administrar por sí solo la fuente de radiación directo al tumor, de esta manera se logran resultados positivos, tanto para el paciente como para el personal médico, ya que utilizando este método se disminuye la exposición del personal y del tejido sano cercano al tumor, el primer paso para iniciar con el tratamiento es introducir el aplicador en el paciente, luego se utilizan unos tubos que se encuentran conectados a un equipo que contiene el material radiactivo, para entonces así administrar la radiación necesaria a cada paciente (16). Y para la planificación del tratamiento en este estudio al igual que en el estudio 3 se utilizó el sistema BrachyVision (versión 13.6).

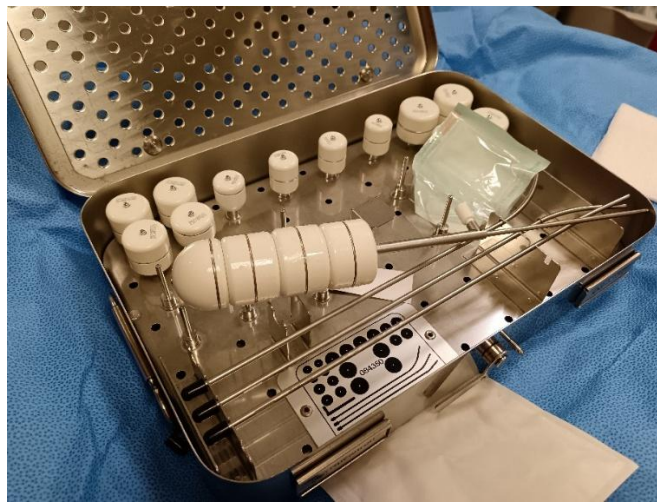
Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Papel de la imagenología dentro del procedimiento de la braquiterapia de alta tasa de dosis

Los aplicadores son los dispositivos utilizados para administrar una dosis de radiación sobre el tumor. Entre los tipos de aplicadores para el tratamiento del cáncer ginecológico se encontraron las agujas intersticiales, los cilindros vaginales (ver figura 1), tándem con cilindros, con ovoides o con anillos, y aplicadores híbridos (17).

Figura 1.

Cilindros vaginales



Nota: imagen de autoría propia, tomada en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá

La imagenología interviene de diferentes maneras dentro del procedimiento de la braquiterapia de alta tasa de dosis. Los estudios coinciden en la utilización de ultrasonido y tomografía computarizada, para la verificación del correcto posicionamiento de los aplicadores.

Antes de seleccionar el aplicador para el tratamiento de los cánceres ginecológicos es ideal contar con una evaluación precisa de la anatomía de cada paciente a tratar, la resonancia magnética es útil para conocer si el tumor ha invadido estructuras cercanas, lo cual es clave para conocer la extensión de la enfermedad, por ello se les realiza a las pacientes una RM para elegir el aplicador adecuado para cada caso. Además, estudios complementarios como la ecografía y la histeroscopia aportan detalles morfológicos importantes sobre el tamaño y disposición del útero, toda esta

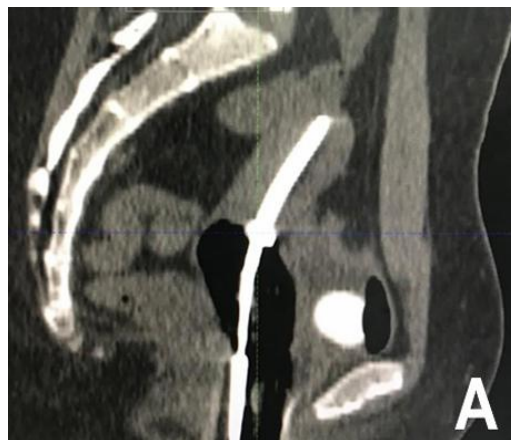
Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

información en conjunto es fundamental al momento de seleccionar el aplicador adecuado para el tratamiento.

Después de insertar el aplicador en el cuerpo de la paciente, se realiza una TC para verificar que el dispositivo se encuentre debidamente posicionado y que no existan desplazamientos de este, antes de administrarle radiación al paciente (ver figura 2). Además, la TC permite observar la proximidad del aplicador a los órganos sanos, lo cual es esencial para minimizar las dosis en estos tejidos, posteriormente estas imágenes se utilizan para planificar la distribución de dosis.

Figura 2.

Imagen de TC en corte sagital, para visualizar el correcto posicionamiento del tándem y ovoides en vagina de una paciente de 28 años con diagnóstico de cáncer cervical localmente avanzado en etapa IIC1.



Nota: tomado de braquiterapia adaptativa guiada por resonancia magnética para el cáncer cervical localmente avanzado: Experiencia del Hospital Carlos Van Buren, por Solís et al., 2020

Por otra parte, los estudios señalan que la RM y la TC, son utilizadas para la delimitación de los volúmenes blanco, es decir, los lugares que deben recibir radiación y los órganos en riesgo como el recto, vejiga y sigmoides (ver figura 3). Algunos estudios implementan la combinación de la RM y TC, donde utilizan la RM para la planificación inicial y posteriormente aplican la TC entre sesiones del tratamiento, las imágenes de TC se alinean junto a la imagen inicial de RM para verificar si se continúa entregando la dosis de manera segura y realizar ajustes en la planificación en caso de que

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

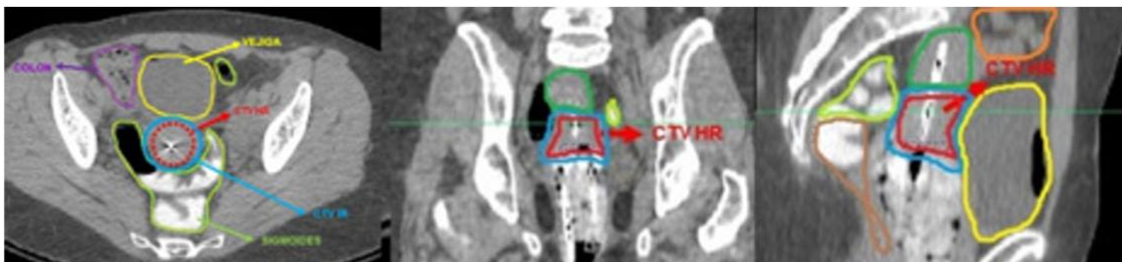
exista un desplazamiento. Además, se indica que la RM es utilizada para la medición de la extensión tumoral macroscópica (GTV), antes y después de la colocación del aplicador. Por su parte, las imágenes de TC pueden iniciar su rol desde la planificación del tratamiento, ayudando a definir la cantidad de dosis y su distribución, facilitando así la posterior reconstrucción del implante en el planificador.

En el caso específico del cáncer de vagina, se utiliza la TC para realiza un topograma de vagina, obteniendo una orientación visual de la extensión del tumor y sus límites. Un topograma es una radiografía panorámica preliminar generado con una TC seleccionando áreas de interés. Este permite el cálculo de la dosis de radiación, ubicar tumores y cómo evolucionan durante el tratamiento (18).

En la braquiterapia, luego de la inserción del aplicador, con un *software* se diseña un plan de tratamiento para la distribución de la dosis de radiación de acuerdo a la anatomía y las características de cada paciente, el equipo médico se encarga de delinear manualmente los volúmenes blancos en las imágenes obtenidas, con el objetivo de entregar la mayor cantidad de dosis a estas áreas, sin afectar los órganos en riesgo para minimizar la aparición de efectos adversos.

Figura 3.

Delimitación de los volúmenes blanco de BTGI3D y de los OAR en los planos axial, coronal y sagital, por medio de una tomografía computarizada



Nota: tomado de braquiterapia guiada por imagen con planificación 3D en cáncer de cuello uterino. Experiencia preliminar, por Urdaneta et al., 2024

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Algunos estudios mencionan la utilización de la secuencia T2 de resonancia magnética en el proceso del tratamiento para cáncer ginecológico, la cual es útil para detectar tejidos con alto contenido de agua como los tumores, resaltándolos en la imagen de manera brillante o hiperintensos. En este contexto, es necesario recordar que la RM utiliza campos magnéticos y ondas de radio para la creación de imágenes detalladas del interior del cuerpo, las cuales son generadas por la respuesta de los núcleos de los átomos del cuerpo a los campos magnéticos. Cuando los protones son excitados por el equipo de RM empiezan a girar de manera coordinada y con el pasar del tiempo comienzan a girar de manera descoordinada, el tiempo que demoran en perder la sincronía es considerado como relajación T2, mientras más prolongada sea esta relajación, mayor será la intensidad registrada en la imagen, y de esta forma se muestran de manera óptima los líquidos y las alteraciones (19).

Cabe señalar que uno de los estudios incorpora el uso de las marcas fiduciales en la resonancia magnética para el tratamiento del cáncer de vagina y vulva, ya que la RM no capta los marcadores radiopacos. Según Academia Lab (20) un marcador fiducial es un objeto visible en imágenes médicas que sirve como un elemento orientado o punto de referencia. En radioterapia y radiocirugía, el uso de las marcas fiduciales asisten a localizar de manera precisa el lugar de tratamiento, estas suelen utilizarse en resonancia magnética y tomografía computarizada.

Otro aspecto relevante en la braquiterapia es la utilización de sistemas de planificación dosimétrica o *software*. En este contexto, de acuerdo con los estudios 3 y 5 el sistema BrachyVision desarrollado por Varian Medical Systems, es compatible con el registro de imágenes de TC y RM, con las cuales el equipo médico puede delimitar los volúmenes blanco y los órganos en riesgo, además de optimizar la distribución de las dosis de radiación, su uso guiado por la imagenología permite realizar el tratamiento de una manera segura y precisa para cada paciente, aumentando la eficacia de la braquiterapia y disminuyendo la afectación de órganos sanos.

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

Técnica imagenológica utilizada con mayor frecuencia en braquiterapia de alta tasa de dosis para cáncer ginecológico

La técnica imagenológica de preferencia para la delimitación de los volúmenes blanco (CTV y GTV) y de los órganos de riesgo sería la (RM). Para esta planificación también se utiliza la tomografía computarizada, sin embargo, se expondrá a continuación, las razones por las que se prefiere el uso de RM.

En el estudio 1, aplicaron el uso de tomografía computarizada por no tener a disposición un equipo de RM, y mencionaron que el para el trazado de los contornos la TC al igual que la RM son métodos adecuados para la determinación de los OAR (órganos a riesgo), sin embargo, la delimitación de los volúmenes blanco en la TC puede sobrestimar la dimensión transversal del tumor y, por tanto, el volumen tratado en comparación con la RM. Por esto, una vez adquirido el equipo de RM se comenzó a utilizar para esta función.

Además, otros estudios (2 al 5) alegan su utilidad a la una mayor resolución de tejidos blandos y precisión anatómica, siendo esto de gran importancia para la delimitación de los OAR y la extensión o volumen tumoral. Concretamente, en el estudio 4, describen el empleo de las técnicas de TC y RM, según el tipo de cáncer ginecológico como lo son el cáncer de endometrio postoperatorio, cáncer de endometrio inoperable, cáncer de cérvix, cáncer de vagina y cáncer de vulva. Según sea el caso, se puede preferir una técnica u otra e incluso utilizarlas de manera combinada, como en el caso del cáncer de endometrio inoperable, donde se puede comenzar realizando un TC para tener la certeza de que se ha colocado el implante en la posición correcta y posteriormente con una RM para delimitar la extensión tumoral macroscópica (GTV) y los órganos a riesgo (OAR). De igual manera, la técnica de RM está indicada para cáncer de cérvix y cáncer de vagina, debido a su precisión en la detección de variaciones en los tejidos, ya que al utilizar TC puede resultar complicado diferenciar el cuello del cuerpo del útero, así como distinguir el cérvix de los tejidos que lo rodean.

En el caso del cáncer de vagina, la RM permite ver el tamaño y morfología del útero, así como define los límites entre el final del cérvix y el inicio del endometrio e implementan marcas fiduciales como ayuda en la delimitación de los límites de la lesión tumoral para evitar errores de

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

cálculo por las posibles deformaciones causadas por el aplicador. Con referencia al estudio 5, los autores relacionan la Braquiterapia guiada por RM con un aumento en la tasa de control local, la cual representa la ausencia de enfermedad residual del 71 % al 90 % a los 3 años para los tumores mayores de 5 cm en el momento del diagnóstico y se reportó una disminución importante en las toxicidades tardías digestivas y urinarias grado 3-4.

Sin embargo, a pesar de los beneficios de la utilización de RM, esta técnica posee ciertas características que limitan su uso, como lo pueden ser su limitada disponibilidad en ciertos centros médicos por lo costoso de su instalación y mantenimiento, la necesidad de personal capacitado, la adquisición y el uso de accesorios compatibles con RM como podrían ser camillas especiales, ya que se deben evitar materiales ferromagnéticos que podrían ser atraídos por el campo magnético y pueden ser peligrosos durante la RM. Entre los artículos que pueden representar un peligro durante una RM están: ciertos marcapasos cardíacos, broches vasculares colocados para prevenir el sangrado de los vasos sanguíneos, algunas bombas para medicamentos implantadas o externas, ciertos implantes cocleares, catéteres con componentes metálicos, algún tipo de fragmento metálico, entre otros.

También se menciona la técnica de ultrasonido como guía para la inserción de los aplicadores, sin embargo, esta no es una técnica funcional para la planificación como si es el caso de la TC y RM.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación llevaron a la conclusión de que la imagenología forma parte fundamental en la planificación del tratamiento de braquiterapia de alta tasa de dosis en cáncer ginecológico, como primer paso para la evaluación previa del paciente que permite conocer la extensión de la enfermedad, las características anatómicas propias del paciente, lo cual es necesario para la elección del aplicador adecuado. Posteriormente se utilizan las tecnologías de imagen para guiar la inserción del aplicador y corroborar su correcto posicionamiento. Estas imágenes también son necesarias para determinar la cantidad de dosis y la distribución de esta. Además, se requerirán

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

para la delimitación de los volúmenes blanco como el volumen tumoral macroscópico (GTV) o el volumen de tratamiento clínico (CTV), y de los órganos a riesgo (OAR).

Con respecto a los avances en la braquiterapia de alta tasa de dosis como tratamiento para el cáncer ginecológico, se observa que con el paso del tiempo se han introducido nuevas técnicas para potenciar el tratamiento, así es como se ha desarrollado la braquiterapia guiada por imagen 3D (BTGI3D). Los autores hacen referencia a otros estudios donde reportaron una mejoría en la sobrevida en las pacientes tratadas con BTGI3D comparada con la braquiterapia convencional, cuya afirmación se respalda en las cifras alentadores de SG y SLE, llegando a ser incluso mayores al 85-90%.

Otra técnica consiste en la tecnología de aplicación única multifraccionada, en la que la dosis total de radiación se administra en varias sesiones o fracciones sin retirar el aplicador, en un periodo de tiempo corto. De acuerdo con los autores, los resultados indican que la braquiterapia guiada por imágenes de alta tasa de dosis dividida en sesiones sin retirar el aplicador entre ellas, es viable en centros médicos que puedan administrar dosis mayores a 85Gy al volumen objetivo clínico de alto riesgo (HRCTV).

La interfaz de optimización interactiva (IOI), el DICOM RT y BrachyVision forman parte de los avances tecnológicos en imagenología que aportan a la optimización del tratamiento. La interfaz de optimización interactiva (IOI) es un sistema que permite al usuario ajustar los parámetros del tratamiento. Con sus algoritmos y controles interactivos se ajustan a las prioridades de asegurar la dosis adecuada al tumor y limitar la exposición de los órganos a riesgo (OAR). Una vez se obtuvo un plan satisfactorio con la interfaz de optimización interactiva (IOI), se transfirieron a través de datos DICOM RT hacia BrachyVision, para realizar la comparación de valores en los resultados del planeamiento de la braquiterapia. BrachyVision es un software de planificación que utiliza las imágenes de tomografía computarizada (TC) y resonancia magnética (RM) para una planificación precisa de los tratamientos. Para determinar la eficiencia de estos sistemas, se emplean los criterios D2cc y D90. Estos criterios de validación se utilizan para comparar los resultados del plan

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

clínicamente aprobado con el desarrollado con la interfaz de optimización interactiva (IOI). En el estudio 3 se mostró una reducción del D2cc en comparación con el plan clínicamente aprobado y en cuanto al D90, el plan desarrollado con la interfaz de optimización interactiva y el plan clínico aprobado mostraron resultados casi idénticos.

La TC al igual que la RM son métodos adecuados para la determinación de los OAR y para la delimitación de los volúmenes blanco, sin embargo, los autores resaltan la preferencia sobre la RM por ofrecer una mayor resolución de tejidos blandos y precisión anatómica. Según el tipo de cáncer ginecológico, se puede preferir una técnica u otra e incluso utilizarlas de manera combinada, como en el caso del cáncer de endometrio inoperable, donde se puede comenzar realizando un TC para tener la certeza de que se ha colocado el implante en la posición correcta y posteriormente con una RM para delimitar la extensión tumoral macroscópica (GTV) y los órganos a riesgo (OAR). También se menciona la técnica de ultrasonido como guía para la inserción de los aplicadores, sin embargo, esta no es una técnica funcional para la planificación como si es el caso de la TC y RM.

Referencias

1. WHO. (2024). Cervical cancer. Obtenido de World Health Organization: https://www.who.int/health-topics/cervical-cancer#tab=tab_1
 2. Urdaneta, N., Reyes, R., Abreu, P., Aguirre, L., Rodríguez, H., Lira, L., y otros. (2024). BRAQUITERAPIA GUIADA POR IMÁGENES CON PLANIFICACIÓN 3D EN CÁNCER DE CUELLO UTERINO. EXPERIENCIA PRELIMINAR. Revista Venezolana de Oncología , 37 (1), 16-36.
 3. Mahantshetty, U., Gurram, L., Bushra, S., Ghadi, Y., Aravindakshan, D., Paul, J., y otros. (2021). Single Application Multifractionated Image Guided Adaptive High-Dose-Rate Brachytherapy for Cervical Cancer: Dosimetric and Clinical Outcomes. International Journal of Radiation Oncology - Biology - Physics , 111 (3), 826-834.
-

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

4. Liu, H., Ma, C. M., Jia, X., Shen, C., Klages, P., & Albuquerque, K. (2021). Interactive Treatment Planning in High Dose-Rate Brachytherapy for Gynecological Cancer. arXiv. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.05081>
5. Rovirosa, À., Samper, P., & Villafranca, E. (Enero de 2022). Braquiterapia 3D guiada por la imagen. Obtenido de Sociedad Española De Oncología Radioterápica: https://seor.es/wp-content/uploads/2023/01/AAFF_Braquiterapia_libro.pdf
6. Solis, J. A., Olivares, J., Tudela, B., Veillon, G., Perrot, I., & Lazcano, G. (2020). Braquiterapia adaptativa guiada por resonancia magnética para el cáncer cervical localmente avanzado: Experiencia del Hospital Carlos Van Buren. Revista Chilena de Obstetricia y Ginecología, 85 (6), 604-616.
7. ONCOSERVICE. (s.f.). Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis – 3D Conformada. Obtenido de ONCOSERVICE: <https://oncoservice.bo/braqui-3d/#:~:text=Braquiterapia%203D%20se%20define%20como,a%20los%20tejidos%20sanos%20proximos>
8. Clínica Universidad de Navarra. (2023). Técnica de imagen digital. Obtenido de Clínica Universidad de Navarra: <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/tecnica-de-imagen-digital#:~:text=La%20t%C3%A9cnica%20de%20imagen%20digital%20en%20medicina%20es%20un%20avance,procesar%20y%20visualizar%20im%C3%A1genes%20m%C3%A9dicas.>
9. NIH Instituto Nacional del cáncer. (s.f.). Diccionario de cáncer del NCI. Obtenido de <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/supervivencia-por-causa-especifica>
10. Chopra, S., Mulani, J., Mittal, P., Singh, M., Shinde, A., Gurrarn, L., y otros. (2 de Noviembre de 2022). Early outcomes of abbreviated multi-fractionated brachytherapy schedule for cervix cancer during COVID-19 pandemic. Obtenido de National Library Of Medicine : <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9626438/>

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

11. Bandyopadhyay, A., Ghosh, K. A., Chhatui, B., & Das, D. (14 de Abril de 2021). Dosimetric and clinical outcomes of CT based HR-CTV delineation for HDR intracavitary brachytherapy in carcinoma cervix — a retrospective study. Obtenido de National Library of Medicine: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8241309/>
 12. Fundación Instituto Roche. (s.f.). Actualización en investigación clínica Glosario de términos. Obtenido de Fundación Instituto Roche: https://www.instituto-roche.es/jornadas/static/jornadas/archivos/Glosario_EECC_seminario_FIR-ANIS.pdf
 13. Law, M. Y., Liu, B., & Chan, L. W. (2009). Informatics in radiology: DICOM-RT-based electronic patient record information system for radiation therapy. *RadioGraphics*, 29 (4), 961-72.
 14. Sandwall, A. P., Feng, Y., Platt, M., Lamba, M., & Mahalingam, S. (2018). Evolution of brachytherapy treatment planning to deterministic radiation transport for calculation of cardiac dose. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958394718300323>
 15. Bobadilla, I. A., & Martínez Pérez, D. A. (2023). BRAQUITERAPIA, UN TRATAMIENTO DE ALTA PRECISIÓN CONTRA EL CÁNCER. *Revista Momentos*, párr. 8-13.
 16. Kadirus, A. S., Othman, A. S., & Ridzuan, A. N. (Enero de 2023). Remote Afterloading Technology: A Short Review. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/371873840_Remote_Afterloading_Technology_A_Short_Review
 17. Rayos Contra Cancer. (6 de Junio de 2022). Sesión 9 - Aplicadores y usos. Fabiola Valencia enseña Sesión 9 - "Aplicadores y usos" del curso de HDR Braquiterapia para físicos médicos, organizado por Rayos Contra Cancer .
 18. Clínica Universidad de Navarra. (2023). Topograma. Obtenido de Clínica Universidad de Navarra: <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/topograma>
-

Avances en la aplicación de braquiterapia de alta tasa de dosis en pacientes con cáncer ginecológico: revisión teórica y enfoque imagenológico

19. Mafraji, A. M. (Noviembre de 2023). Resonancia Magnética. Obtenido de Manual MSD:
<https://www.msmanuals.com/es/professional/temas-especiales/principios-de-estudios-por-la-imagen-radiol%C3%B3gicas/resonancia-magn%C3%A9tica>
 20. Academia Lab. (16 de Mayo de 2025). Academia Lab. Obtenido de Marcador fiducial:
<https://academia-lab.com/enciclopedia/marcador-fiducial/>
-