

Comparación de técnicas de planificación en radioterapia para cáncer de mama: Un estudio multicéntrico en unidades docentes de radiofísica hospitalaria

Comparison of Planning Techniques in Radiotherapy for Breast Cancer: A Multicentre Study in Hospital Medical Physics Teaching Units

Rafael Ayala Lázaro^{1,34}, Francisco Javier Jiménez Albericio^{2,35}, María Luisa Ferrández Millán³, Antonio López Medina^{4,*}, Julien Alcaide de Wandeleer⁵, Emilio Altozano Ruiz⁶, Lorena Álvarez Bernardo⁷, Alberto Angulo Santos⁸, Pablo Arias Castro⁹, Beatriz Casasola Muñoz¹⁰, Rubén Chillida Rey¹¹, José Antonio Cuesta Reina¹, Sara Delgado Espinosa¹², Laura Díaz Tomé¹³, Óscar Estrada Pastor¹⁴, Tatiana Fernández Sánchez¹⁵, Antonio Gañán Mora¹⁶, Nicolás García Iglesias¹⁷, Tomás González González¹⁸, Elena González González², Pedro Matías Liñán Rodríguez¹⁹, Paula Llamas Martínez²⁰, María Martín Fontán²¹, Alberto Martínez Moreno²², Daniel Alexander Musson Gómez¹, Nuria Naranjo Jiménez²³, Guillermo Paradela Díaz²⁴, Francisco Piqueras Guardiola²⁵, Jaime Reverter Pérez⁴, Víctor Riu Molinero²⁶, Jesús Javier Rivas Morales²⁷, Miriam Sánchez Pérez²⁸, Rafael Manuel Segovia Brome²⁹, Javier Uzquiza López³⁰, Guillermo Veiguela Prado³¹, Rodrigo Vicente Bernal³², Naia Pereda Barroeta³³

¹ Servicio de Dosimetría y Radioprotección, Hospital General Universitario Gregorio Marañón.

² Servicio de Física y Protección Radiológica, Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa.

³ Servicio de Oncología Radioterápica, Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa.

⁴ Servicio de Radiofísica, Complejo Hospitalario Universitario de Vigo.

⁵ Servicio de Oncología Radioterápica y Radiofísica, Hospital Universitari i Politecnici La Fe de Valencia.

⁶ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital Universitario Virgen de las Nieves.

⁷ Servei de Protecció Radiològica i Física Mèdica, Hospital Universitari Sant Joan de Reus.

⁸ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Instituto Valenciano de Oncología.

⁹ Servicio de Radiofísica Hospitalaria, Hospital Universitario Son Espases.

¹⁰ Servicio de Radiofísica, Hospital Universitario Puerta del Mar.

¹¹ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital Universitario Ramón y Cajal.

¹² Servicio de Radiofísica, Hospital Universitario Virgen del Rocío.

¹³ Servicio de Radiofísica, Hospital Universitario San Cecilio.

¹⁴ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Complejo Hospitalario Doctor Negrín.

¹⁵ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital Universitario Reina Sofía.

¹⁶ Servicio de Física Médica, Hospital Universitario Clínico San Carlos.

¹⁷ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital Universitario de Navarra.

¹⁸ Servicio de Física y Protección Radiológica, Hospital Universitario Miguel Servet.

¹⁹ Servicio de Radiofísica Hospitalaria, Hospital Universitario Puerta de Hierro.

²⁰ Servicio de Protección Radiológica y Radiofísica Hospitalaria, Complejo Hospitalario Universitario de Badajoz.

²¹ Servicio de Radiofísica Hospitalaria, Hospital Universitario 12 de Octubre.

²² Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Clínica Universidad de Navarra.

²³ Servicio de Radiofísica Hospitalaria, Hospital Regional Universitario de Málaga.

²⁴ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital Universitario de La Princesa.

²⁵ Servicio de Física Médica, Hospital Universitario de Canarias.

²⁶ Servei de Radiofísica i Radioprotecció, Hospital de la Santa Creu i Sant Pau.

*Correspondencia: antonio.lopez.medina@sergas.es

<https://doi.org/10.37004/sefm/2025.26.2.001>

²⁷ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital General Universitario de Ciudad Real.

²⁸ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital Clínico Universitario de Valladolid.

²⁹ Servicio de Oncología Radioterápica, Hospital Universitario Virgen Macarena.

³⁰ Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Hospital Universitario Marqués de Valdecilla.

³¹ Servicio de Física Médica y Protección Radiológica, Hospital Universitario Central de Asturias.

³² Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica, Complejo Asistencial Universitario de Salamanca.

³³ Servicio de Oncología Radioterápica, Hospital Universitario de Basurto.

³⁴ Grupo de Física Nuclear e IPARCOS, Departamento de Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica, Universidad Complutense de Madrid.

³⁵ Centro de Astropartículas y Física de Altas Energías, Universidad de Zaragoza.

Fecha de Recepción: 27/01/2025 - Fecha de Aceptación: 22/10/2025

Proponemos un ejercicio que aplica aprendizaje basado en competencias y que evalúa la variedad de técnicas de radioterapia externa empleadas en distintas unidades docentes de España para tratar cáncer de mama.

Los asistentes al curso Fundamentos de Física Médica rellenaron un formulario donde expusieron las técnicas utilizadas en sus hospitales. Se compartió con ellos la información para realizar una planificación (imágenes tomográficas y estructuras) en respiración libre e inspiración forzada y realizaron una planificación según las técnicas habituales de cada hospital. Se desarrolló un código para comparar datos de diferentes planificadores y se analizó la significación estadística de la diferencia dosimétrica en diferentes volúmenes.

Los resultados muestran una gran variedad de técnicas utilizadas, destacando la radioterapia conformada 3D (37.5%) y la arcoterapia volumétrica de intensidad modulada (34.4%). Respecto a las planificaciones, se obtuvo mejor cobertura de los volúmenes blanco y menor dosis a los órganos de riesgo para la paciente simulada en inspiración forzada. También se analizó la influencia del tiempo de formación del residente.

El ejercicio propuesto sirve para evaluar la destreza del residente en la planificación para radioterapia de un tratamiento de cáncer de mama. Los datos para replicar el ejercicio están disponibles en un repositorio.

Palabras clave: Cáncer de mama, radioterapia, unidad docente, aprendizaje basado en competencias, estudio multicéntrico.

We propose an exercise that applies competency-based learning and evaluates the variety of external radiotherapy techniques used in different teaching units in Spain to treat breast cancer. Those attending the Fundamentals of Medical Physics course filled in a form where they presented the techniques used in their hospitals. The information for planning (tomographic images and structures) in free breathing and forced inspiration was shared with them and they made a planning according to the usual techniques of each hospital. A code was developed to compare data from different planners and the statistical significance of the dosimetric difference in different volumes was analyzed.

The results show a wide variety of techniques used, with 3D conformal radiotherapy (37.5%) and volumetric intensity-modulated arc therapy (34.4%) standing out. Regarding planning, better coverage of target volumes and lower dose to organs at risk was obtained for the patient treated in forced inspiration. The influence of the resident's training time was also analyzed.

The proposed exercise serves to evaluate the resident's skill in radiotherapy planning for breast cancer treatment. The data to replicate the exercise are available in a repository.

Key words: Breast cancer, radiotherapy, teaching unit, competency-based learning, multicenter study.

1. Introducción

Los profesores del módulo 4, *Bases físicas, equipos y control de calidad en Radioterapia Externa II (Dosimetría clínica)*, del Diploma de Experto en Fundamentos de Física Médica (*“curso de Baeza”*) 2023-2024, organizado por la SEFM y la UNIA, hemos decidido proponer un caso práctico en la fase posterior del curso, ya que en un modelo de aprendizaje basado en las competencias¹ se debe evaluar la habilidad para llevar a cabo las tareas y demostrar el conocimiento adquirido. Este trabajo complementa el

propósito inicial del curso, que es cubrir gran parte de la formación teórica en la especialidad de Radiofísica Hospitalaria y uniformizar los conocimientos teóricos básicos de esta disciplina clínica.² Además, permite una evaluación de las competencias adquiridas, lo que lo aproxima al modelo formativo propuesto en el Core Curriculum elaborado por el grupo de trabajo conjunto de la European Federation of Organisations for Medical Physics (EFOMP) y la European Society of Radiation Oncology (ESTRO).³ De hecho, Moideen et al.⁴ han aportado evidencias de que tanto el contorneo de volúmenes como la planificación son las áreas que

mejor se pueden adaptar a un currículum basado en competencias.

En los últimos años, los tratamientos de radioterapia han experimentado avances significativos en términos de dosis, fraccionamiento y técnicas dosimétricas empleadas.⁵ La disponibilidad de herramientas de imagen cada vez más precisas ha permitido una mejor definición del volumen blanco y de los órganos sanos adyacentes. Esto, combinado con la introducción de equipos de tratamiento más versátiles, así como el desarrollo de algoritmos de cálculo más rápidos y precisos, ha llevado a un abandono progresivo de la radioterapia conformada en tres dimensiones (3DCRT)⁶ a favor de técnicas de intensidad modulada (IMRT)⁷ o de arcoterapia volumétrica de intensidad modulada (VMAT).⁸ Estas modalidades terapéuticas permiten disminuir los márgenes en los volúmenes de tratamiento y aplicar esquemas hipofraccionados, optimizando así los resultados clínicos y el aprovechamiento de las unidades de tratamiento. No obstante, las técnicas de IMRT y VMAT pueden aumentar el volumen de tejido irradiado a dosis bajas,⁹ además de llevar frecuentemente asociado un proceso de verificación del tratamiento que aumenta la carga de trabajo.

A pesar de representar un porcentaje significativo de los tratamientos de radioterapia, el cáncer de mama presenta una notable variabilidad en su abordaje dosimétrico entre centros, incluso cuando se utilizan el mismo sistema de planificación y el mismo acelerador. Aún no existe un consenso claro sobre la mejor técnica de tratamiento para esta patología, en función del centro pueden incluir IMRT, VMAT, 3DCRT, así como técnicas híbridas combinación de las anteriores.⁹⁻¹² Además, se emplean diferentes métodos de posicionamiento, con imágenes portales y/o tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), y varias herramientas de control respiratorio.¹³⁻¹⁵ Por todo ello se ha creado un grupo de trabajo de la EFOMP* con el objetivo de buscar un consenso en Europa, que aún no ha publicado su informe final. No obstante, en lo que respecta al fraccionamiento, a la dosis prescrita y al contorno de volúmenes,¹⁶⁻¹⁸ sí que hay un mayor consenso en la actualidad y el panel de expertos de la sociedad alemana de oncología (DEGRO) recomienda el uso de control respiratorio para reducir la dosis en el corazón si se trata de la mama izquierda.¹⁹

Por esta razón, hemos diseñado para los alumnos un trabajo fin de módulo en el que tengan que abordar la dosimetría de una paciente con un tumor en la mama izquierda, por un lado, en condiciones de respiración libre (RL), y por otro, en condiciones de inspiración forzada (IF). El objetivo principal de este ejercicio es que los radiofísicos en formación profundicen en este tipo

de dosimetrías aplicadas al tratamiento del cáncer de mama. Además, permite comparar los distintos planteamientos que se emplean en cada centro y valorar, desde el punto de vista docente, las destrezas adquiridas por los alumnos en planificación dosimétrica. La realización de ambas dosimetrías permite constatar el beneficio terapéutico que puede llegar a suponer el uso de herramientas de control respiratorio en este tipo de tratamientos, sin perder de vista que el empleo de estas herramientas está condicionado por la capacidad de colaborar de la paciente.

Somos conscientes de que no en todos los centros se prescribe la misma dosis ni fraccionamiento y que tampoco se exigen los mismos objetivos para los volúmenes blanco (PTVs) ni restricciones para los órganos de riesgo (OARs). Por ello, a fin de facilitar el desarrollo de este trabajo, y dado que los requisitos del ensayo Radiation Therapy Oncology Group (RTOG) 1005²⁰ son los más utilizados, decidimos que se llevaran a cabo las dosimetrías siguiendo las prescripciones de dosis de este documento. En concreto, optamos por el fraccionamiento de la rama II del ensayo, que se corresponde con un tratamiento con boost integrado, con una prescripción de 15 fracciones de 40.05 Gy al PTV_MI (mama izquierda) y 48 Gy al PTV_48 (lecho quirúrgico).

Esta publicación surge con el propósito de mostrar los diferentes resultados dosimétricos obtenidos por los estudiantes y dejar evidencia de la variabilidad de técnicas que se utilizan en los distintos centros para abordar el mismo caso clínico. El estudio tiene la limitación de que las planificaciones han sido realizadas por radiofísicos en formación, por lo que es probable que no estén optimizadas y que no sean representativas de los resultados dosimétricos que se pueden llegar a obtener en sus centros. No obstante, la experiencia del alumno en radioterapia en el momento de realizar las dosimetrías ha sido una variable considerada.

2. Material

En la fase previa no presencial del Módulo 4 del Diploma de Experto en Fundamentos de Física Médica, los alumnos rellenaron un primer formulario en el que se les preguntaba sobre el abordaje del tratamiento de cáncer de mama con radioterapia externa en sus respectivos centros. Las respuestas a este formulario constatan la variedad de técnicas utilizadas para el mismo caso.

En la fase posterior no presencial, la actividad propuesta para el trabajo fin de módulo fue la realización de la planificación del tratamiento y el cálculo dosimétrico para el caso de una paciente con un cáncer de mama izquierda siguiendo las directrices de su unidad. Para ello, los participantes recibieron dos estudios de

* EFOMP. Working Group "Volumetric Modulated Arc Therapy. 2022. Available from: <https://www.efomp.org/index.php?r=news/view&id=291> [Last accessed: 23/06/2025].

tomografía computarizada (CT) de la misma paciente, uno en RL y otro en IF, ambos realizados en un equipo *Somatom Go* (Siemens Healthcare GmbH, Erlangen, Alemania), con el sistema de control respiratorio RPM (Varian Medical Systems, Palo Alto, California, EE.UU). La especialista en Oncología Radioterápica que participa como docente en el módulo, basándose en el consenso de definición de contornos en cáncer de mama de RTOG, European Organisation for Research and Treatment of Cancer (EORTC) y ESTRO,²¹ y aplicando su experiencia de más de 150 tratamientos de pacientes con cáncer de mama al año en los últimos 5 años, contorneó en ambas series de imágenes PTV_MI, PTV_48, así como los órganos de riesgo que recomienda el documento RTOG 1005.

2.1. Solicitud de consentimiento informado y descripción del trabajo

La paciente cuyo caso fue elegido firmó un consentimiento informado en el que cedía sus datos para que pudieran ser usados como material docente y de investigación. Además, se solicitó autorización para la realización de proyectos de formación e investigación con material del centro sanitario en el que fue tratada la paciente. El proyecto de esta actividad se presentó ante el comité de Ética en la Investigación de la Comunidad Autónoma de Aragón. Todos los archivos que contienen información clínica de la paciente se han anonimizado. El tratamiento recibido por la paciente no ha sido influido, ni condicionado en modo alguno por la realización de este estudio. Asimismo, los alumnos firmaron un documento de confidencialidad en el que se comprometían a utilizar los datos proporcionados sólo para la actividad propuesta.

Junto con las instrucciones del trabajo, a los alumnos les fueron proporcionadas dos carpetas que contenían las imágenes de CT y estructuras delimitadas, tanto en RL como en IF.

Además, se incluyó el protocolo del ensayo clínico RTOG 1005²⁰ para que lo consultaran y utilizaran como referencia, marcando éste los objetivos de cobertura de los PTVs y las restricciones de dosis de los OARs.

Finalmente, tras valorar la utilidad del caso para otros profesionales, y contando con un nuevo consentimiento informado de la paciente, tanto las imágenes como sus estructuras asociadas se hicieron públicas en un repositorio en Zenodo.[†]

[†]Ferrández M, Jiménez J, Ayala R, et al. Breast Cancer: CT and Structures. Free-Breathing vs DIBH Technique. 2024; doi: 10.5281/ZENODO.14176420. <https://zenodo.org/records/15516915>

2.2. Criterios dosimétricos analizados

Basándonos en las instrucciones de la rama II del ensayo clínico RTOG 1005, se consideró un cumplimiento estricto cuando la planificación cumplía los criterios dosimétricos de la tabla 1:

Tabla 1. Criterios dosimétricos utilizados para valorar el cumplimiento estricto de las instrucciones del ensayo clínico RTOG 1005.

Estructura	Objetivo dosimétrico
Pulmón izquierdo	V4Gy ≤ 50%
	V8Gy ≤ 35%
	V16Gy ≤ 15%
Pulmón derecho	V4Gy ≤ 10%
Corazón	Dosis media ≤ 4 Gy
	V8Gy ≤ 30%
	V16Gy ≤ 5%
Mama derecha	Dosis máxima ≤ 2.64 Gy
PTV_MI	V36Gy ≥ 90%
	V38Gy ≥ 95%
	V43.2Gy ≤ 50%
	V48Gy ≤ 30%
PTV_48	Dosis máxima ≤ 55.2 Gy
	V52.8Gy ≤ 10%
	V43.2Gy ≥ 90%
	V45.6Gy ≥ 95%

Se consideró un cumplimiento laxo cuando se hubieron conseguido todos los objetivos de la tabla 1, con excepción del criterio de dosis máxima en la mama derecha, que era el parámetro más complicado de lograr.

Cabe señalar que, con fines docentes y para simplificar la actividad, se proporcionaron a los alumnos los criterios tal como se recogen en la tabla, sin diferenciar entre objetivos de optimización y variaciones aceptables, aunque dicha distinción está contemplada en el documento original del RTOG 1005. Por ejemplo, los criterios dosimétricos V38Gy ≥ 95% y V36Gy ≥ 90% podrían parecer, a priori, redundantes. Sin embargo, esta aparente duplicidad se debe a que el primero corresponde a un objetivo de planificación, mientras que el segundo representa una variación aceptable dentro de los márgenes establecidos por el protocolo.

2.3. Cuestionario

Una vez finalizado el curso, se consideró la posibilidad de recabar información adicional para la elaboración de un estudio basado en los planes de tratamiento presentados por los alumnos mediante un cuestionario con preguntas relativas al abordaje de las dosimetrías de mama, en particular mama izquierda, en sus respectivos centros.

El cuestionario contenía, además de las preguntas de identificación del participante, otras once preguntas repartidas en tres bloques: simulación de tratamientos similares en su centro, planificación de tratamientos similares en su centro y experiencia previa del participante en la planificación de tratamientos de radioterapia externa. Esta información fue necesaria para clasificar de forma precisa las planificaciones enviadas.

3. Método

3.1. Planificación de los tratamientos

Los participantes en este estudio, que provenían de 31 unidades docentes de España, importaron los archivos DICOM (ambas series de imágenes y los dos conjuntos de estructuras) y generaron un paciente nuevo en el planificador de su hospital.

Se solicitó a cada uno de ellos que realizara dos planificaciones haciendo uso de la técnica implementada en su centro, tanto para el caso de RL, como para el de IF, intentando respetar, en la medida de lo posible, las restricciones del ensayo clínico RTOG 1005. Por otra parte, se recomendó a aquellos que aún no hubieran rotado por radioterapia o que llevaran muy poco tiempo realizando tareas de dosimetría clínica, que pidieran ayuda a un compañero residente con más experiencia o a un radiofísico especialista. Se indicó a los participantes que, si bien debían tratar de optimizar sus planificaciones siguiendo las técnicas habituales de su centro, el objetivo principal del ejercicio era poner de manifiesto las diferencias dosimétricas derivadas del uso de dos técnicas de inmovilización distintas, más que competir por obtener la mejor planificación posible. Esto permitiría, además, valorar las competencias adquiridas en función de la experiencia del alumno. Para reducir la variabilidad de los resultados, se indicó a los participantes que aplicaran la curva de calibración número CT/densidad electrónica (CT/ED) o número CT/densidad másica (CT/MD), así como el algoritmo de cálculo que utilizan habitualmente en su centro para las dosimetrías de mama.

Una vez realizadas las dos dosimetrías, tuvieron que evaluarlas y comprobar si cumplían los criterios que se indican en el ensayo RTOG 1005, tanto para los PTVs

como para los OARs. Por último, subieron los archivos DICOM resultantes RTPlan y RTDose de ambas planificaciones a una carpeta disponible para los docentes.

Posteriormente, los alumnos que voluntariamente quisieron participar en este estudio completaron el cuestionario citado en el apartado 2.3.

3.2. Análisis de las planificaciones

Los datos DICOM proporcionados por los alumnos fueron analizados con la herramienta *dicompyler-core*[‡] para extraer información y estadísticas de las diferencias entre los centros participantes. En este proceso se desestimaron las planificaciones que no alcanzaran PTV_MI V38Gy >90% y PTV_48 V45.6Gy >90% por no considerarse clínicamente aceptables.

En primer lugar, se compararon los resultados dosimétricos obtenidos en RL y en IF, incluyendo en esta comparación todas las planificaciones. Para este primer análisis se realizó una prueba de rangos con signo de Wilcoxon bilateral, aplicada a la diferencia de las medianas entre los distintos grupos dado que, a priori, no fue posible asumir la normalidad de las muestras obtenidas. Se consideraron estadísticamente significativos los valores de p menores o iguales a 0.05. Posteriormente, se segmentaron los resultados según la técnica de irradiación y la experiencia previa del alumno.

Para el análisis de la técnica de irradiación, se decidió agrupar las planificaciones en tres grupos: 3D, IMRT y VMAT. El grupo 3D engloba las técnicas de 3D conformada, *Field-in-Field* e híbrida (*Field-in-Field* para la mama con un campo VMAT para el boost y/o un campo VMAT homogeneizador). El grupo IMRT comprende *IMRT Step&Shoot* e *IMRT Sliding Window*, y, por último, VMAT incluye exclusivamente técnicas volumétricas de arcoterapia. En primer lugar, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para identificar los criterios dosimétricos con diferencias estadísticamente significativas entre alguno de los grupos. Posteriormente, se llevó a cabo una prueba U de Mann-Whitney entre las distintas técnicas, de forma pareada, para evaluar la significación estadística de las diferencias observadas.

En cuanto a la experiencia previa en tratamientos de mama, los datos se segmentaron en dos grupos: alumnos que habían realizado menos de 10 planificaciones y el otro grupo con los que habían realizado más de 10. Nuevamente, se realizó una prueba U de Mann-Whitney para evaluar las posibles diferencias estadísticamente significativas.

[‡] Panchal A, Pyup.lo Bot, Cutright D, et al. *Dicompyler/Dicompyler-Core*: V0.5.6. 2023; doi: 10.5281/ZENODO.7908530. <https://zenodo.org/records/7908530>

4. Resultados

4.1. Descripción de la muestra de alumnos participantes

El número de alumnos matriculados en el módulo 4 en el curso 2023-2024, residentes de Radiofísica Hospitalaria en centros situados en España, fue de 43, de los cuales 35 enviaron correctamente las planificaciones y sus resultados superaron los criterios mínimos de calidad descritos en el apartado anterior. La mayoría de ellos (59.4%) estaban en su segundo año de formación (R2), mientras que 6 (18.8%) estaban iniciando la residencia (R1), y los 7 restantes (21.9%) estaban en su último año de formación (R3). No obstante, su tiempo de rotación en radioterapia era muy diverso como se puede apreciar en la fig. 1, que muestra un diagrama sectorial de la distribución de alumnos en seis grupos que van desde los que no habían rotado todavía a los que superaban los 12 meses de rotación.

El cuestionario posterior fue respondido por 32 alumnos, pero no todos ellos se encontraban en el grupo de 35 alumnos cuya planificación fue aceptada. El número de alumnos que enviaron correctamente las planificaciones con resultados clínicamente aceptables y que, además, respondieron al cuestionario fue de 24. Esto explica que, en los siguientes resultados, el número de muestras (N) varíe entre 35, 32 y 24.

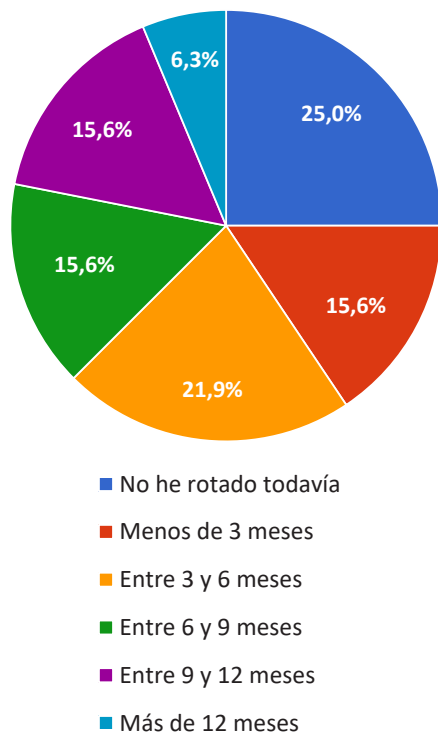


Fig. 1. Distribución de la experiencia previa en radioterapia de los participantes (32 respuestas).

Para evaluar la influencia de la experiencia previa, además del tiempo de rotación, se ha considerado el número de tratamientos de cáncer de mama planificados previamente (fig. 2). Los alumnos que pidieron ayuda para realizar el ejercicio fueron todos los que no habían realizado ningún tratamiento similar, y además uno que había realizado menos de 10 y otro que había realizado entre 10 y 20. El resto de los alumnos no recibieron ayuda.

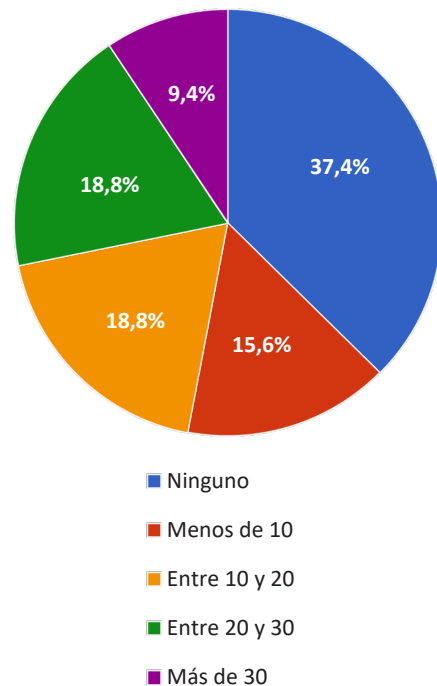


Fig. 2. Distribución del número de tratamientos planificados de mama antes de la realización del ejercicio (32 respuestas).

4.2. Descripción del equipamiento disponible

Tal y como muestra la fig. 3, un 65.6% de los alumnos estaban familiarizados con un sistema de IF al disponer de este sistema en su hospital, frente al 34.4% que no.

Los sistemas de planificación (fig. 4) empleados son también muy variados: Eclipse (Varian Medical Systems, Palo Alto, California, EE.UU.), Monaco (Elekta, Crawley, Reino Unido), Pinnacle (Philips, Eindhoven, Países Bajos), Raystation (RaySearch Laboratories AB, Estocolmo, Suecia), PCRT 3D (Técnicas Radiofísicas, Zaragoza, España) y Precision (Accuray, Madison, Wisconsin, EE.UU.). De los 32 participantes, 22 realizaron el cálculo de dosis en medio, mientras que 10 realizaron el cálculo de dosis en agua.

Respecto al equipo de tratamiento (fig. 5) para el que el alumno realizó la planificación, el más frecuente es un acelerador lineal TrueBeam (Varian Medical

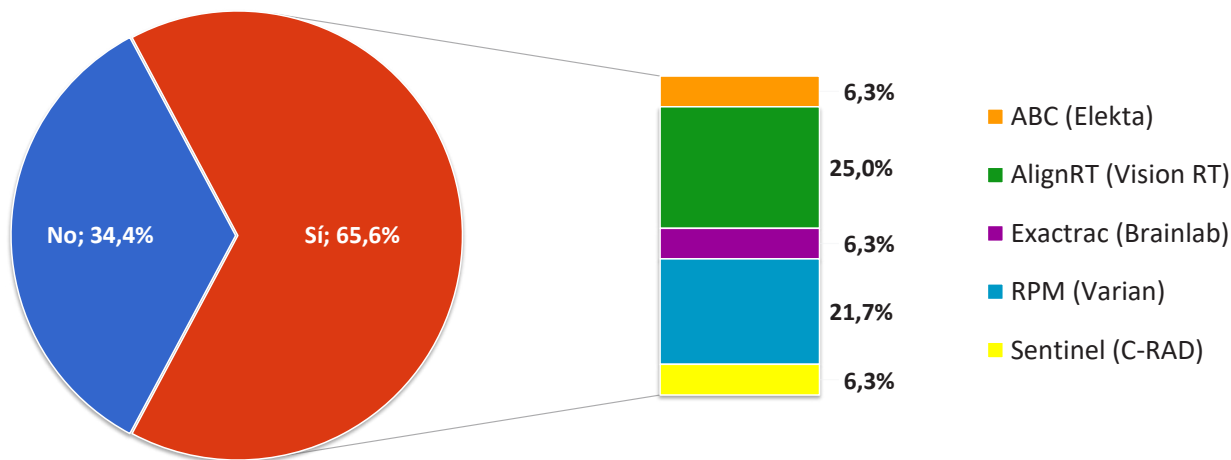


Fig. 3. Distribución del sistema de IF de los centros de procedencia de los alumnos (32 respuestas).

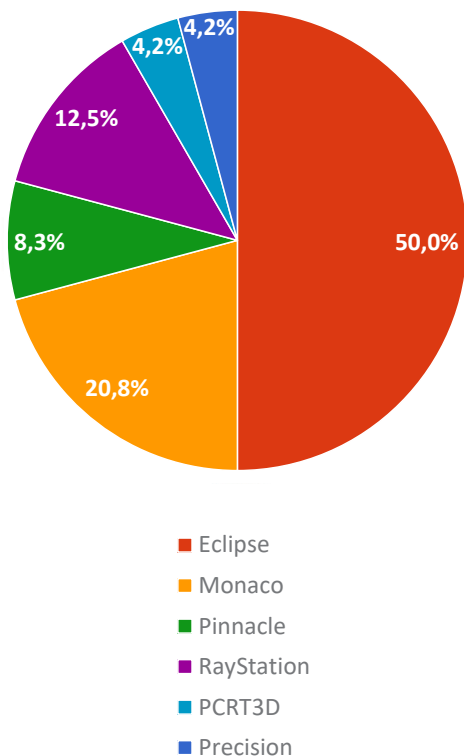


Fig. 4. Diagrama de la distribución del sistema de planificación de los alumnos del estudio (24 respuestas).

Systems, Palo Alto, California, EE.UU.), elegido en el 41.7%, seguido de un VERSA (Elekta, Crawley, Reino Unido), elegido en el 33.3%. Representados con un solo equipo están Edge, Clinac, Halcyon y VitalBeam de Varian, Infinity de Elekta y TomoTherapy de Accuray (Madison, Wisconsin, EE.UU.).

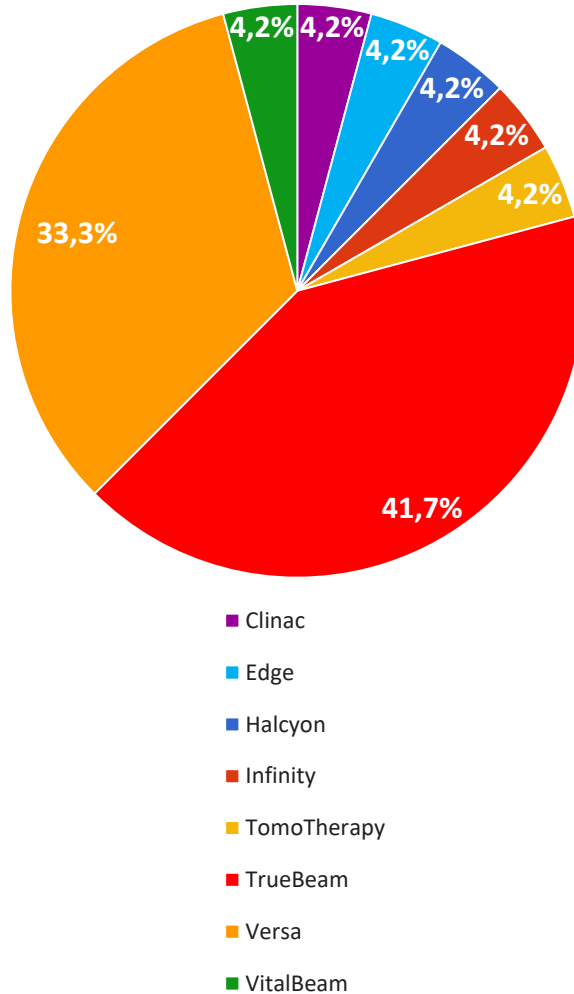


Fig. 5. Diagrama de la distribución del equipo donde se podría tratar la planificación realizada (24 respuestas).

4.3. Descripción de las técnicas empleadas

Las técnicas más empleadas fueron las incluidas en el grupo que se ha categorizado como 3D (37.5%), seguida de la técnica VMAT (34.4%). Finalmente, la técnica con campos de IMRT (Step&Shoot o técnica dinámica) representó sólo el 28.1% (32 respuestas). La mayoría de los participantes eligió campos con energías de 6 MV con filtro aplanador (FF). Sin embargo, un 9.4% optó por campos de 6 MV sin filtro aplanador (FFF).

4.4. Descripción de resultados obtenidos en las planificaciones

4.4.1. Resultados dosimétricos en IF vs. RL

En esta sección se muestran las comparaciones de los planes de tratamiento generados para la paciente, en condiciones de IF y RL, de los alumnos que enviaron correctamente las planificaciones, con resultados

clínicamente aceptables, y que respondieron al cuestionario (N = 24).

Cabe destacar que los planes fueron realizados en distintos hospitales, empleando diversos sistemas de planificación y calibraciones específicas de cada acelerador lineal. Esta variabilidad introduce diferencias significativas en el número de unidades monitor (UM), derivadas fundamentalmente de los métodos de calibración utilizados y de los algoritmos implementados en cada sistema. Por este motivo, se ha optado por no realizar un análisis estadístico de las UM, presentando únicamente una comparación descriptiva (fig. 6) y dejando constancia de que las discrepancias observadas no deben interpretarse como diferencias clínicas relevantes.

En la fig. 7 se pueden observar las distribuciones obtenidas de los distintos parámetros dosimétricos evaluados, recogidos en la tabla 1, distinguiendo entre los casos de RL e IF. Las mayores diferencias se observan en los criterios dosimétricos correspondientes al pulmón izquierdo y en la dosis media en el corazón.

En la tabla 2 se presentan las diferencias de las medianas de cada punto de referencia del histograma

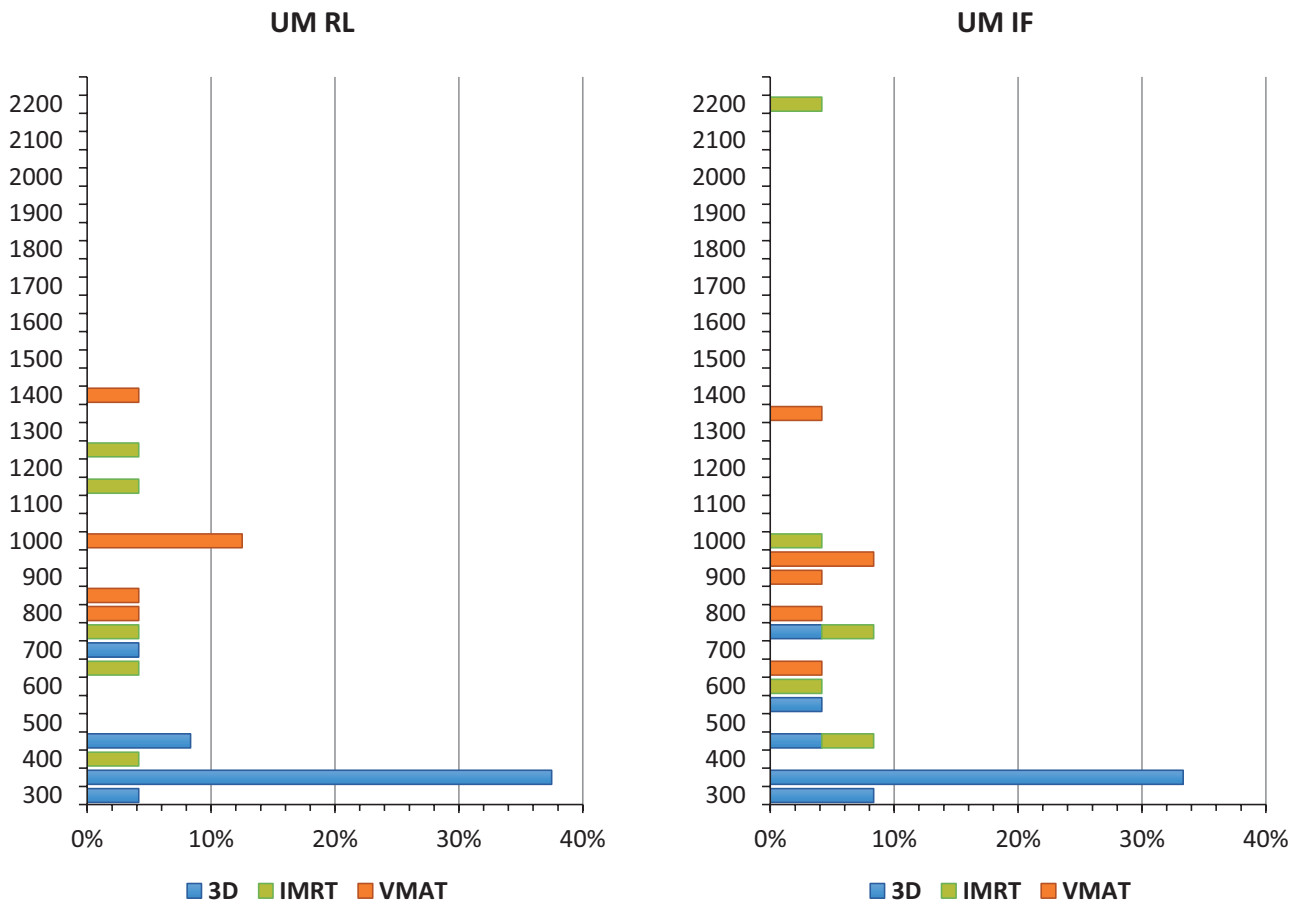


Fig. 6. Distribución de las UM calculadas por los alumnos para los casos de RL e IF en función de la técnica utilizada (24 respuestas).

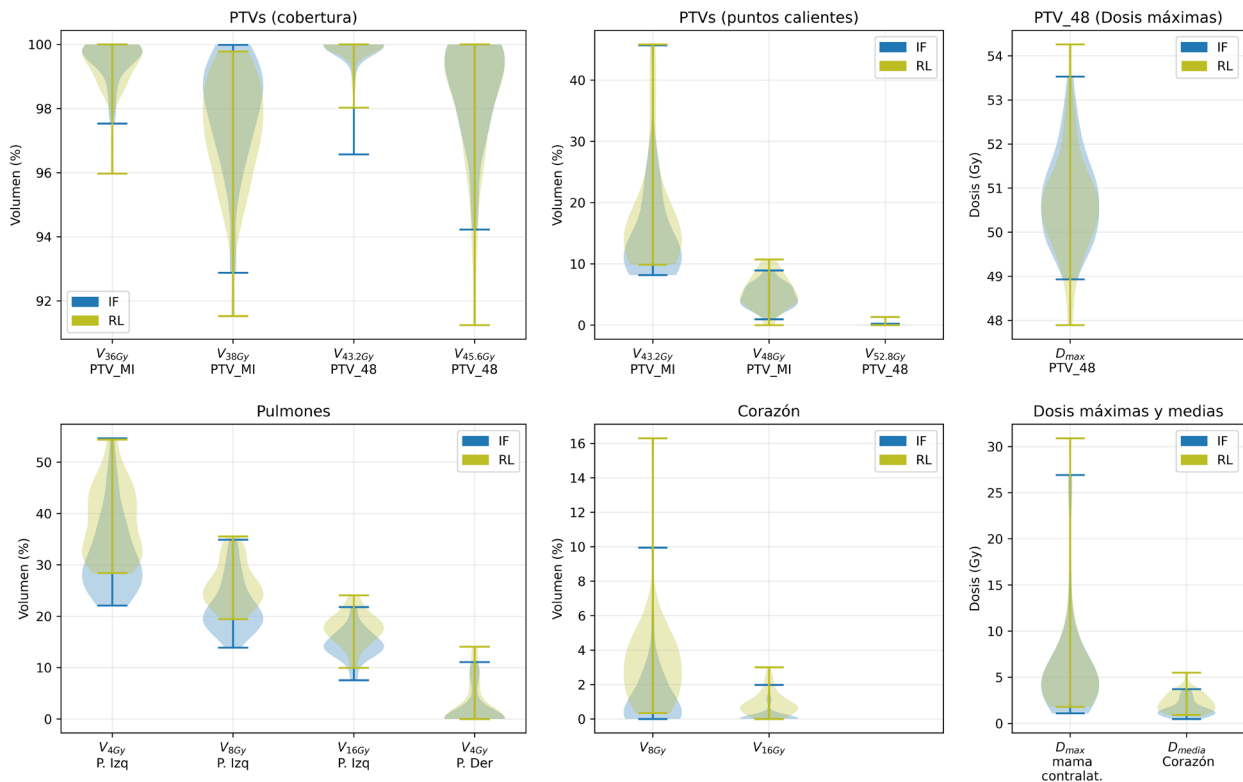


Fig. 7. Comparativa de los distintos criterios dosimétricos indicados en el ensayo clínico RTOG 1005 (N = 35).

junto con el valor p del test de los rangos con signo de Wilcoxon. Sólo se muestran los resultados con valores de p menores o iguales a 0.05, que son los que consideramos estadísticamente significativos (N = 35).

El análisis de Wilcoxon muestra diferencias significativas entre los planes de tratamiento en RL e IF en

varios criterios dosimétricos. Se observa que el porcentaje de volumen de PTV de mama izquierda irradiado a 48 Gy y 43.2 Gy es mayor en RL, mientras que el PTV irradiado a 38 Gy presenta una menor mediana en RL. En el pulmón izquierdo, los volúmenes irradiados a 16, 8 y 4 Gy son significativamente más altos en RL.

Tabla 2. Valores de la mediana de los distintos criterios dosimétricos, junto con su diferencia y el valor p resultante de la prueba de Wilcoxon. Los valores entre paréntesis indican el rango intercuartílico (RIC). Sólo se muestran los criterios en los que se observan diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$).

Estructura	Criterio dosimétrico	Mediana (RIC) RL	Mediana (RIC) IF	Diferencia (RL - IF)	p
PTV_MI	V48Gy (%)	5.3 (3.7 a 7.0)	4.6 (3.5 a 6.1)	0.7	0.008
	V43.2Gy (%)	15.5 (12.2 a 18.5)	12.2 (9.8 a 18.1)	3.3	< 0.001
	V38Gy (%)	97.5 (96.3 a 98.8)	98.4 (97.2 a 99.1)	-1.0	0.006
Pulmón izquierdo	V16Gy (%)	17.7 (16.0 a 19.2)	14.5 (13.1 a 16.0)	3.1	< 0.001
	V8Gy (%)	25.2 (23.1 a 28.4)	20.5 (18.8 a 24.6)	4.7	< 0.001
	V4Gy (%)	37.4 (31.9 a 43.4)	29.9 (26.2 a 37.3)	7.5	< 0.001
Corazón	V16Gy (%)	0.7 (0.5 a 1.1)	0.0 (0.0 a 0.1)	0.7	< 0.001
	V8Gy (%)	3.3 (1.5 a 4.0)	0.4 (0.1 a 1.9)	2.9	< 0.001
	Dmedia (Gy)	2.1 (1.5 a 3.1)	1.2 (0.9 a 1.8)	0.9	< 0.001

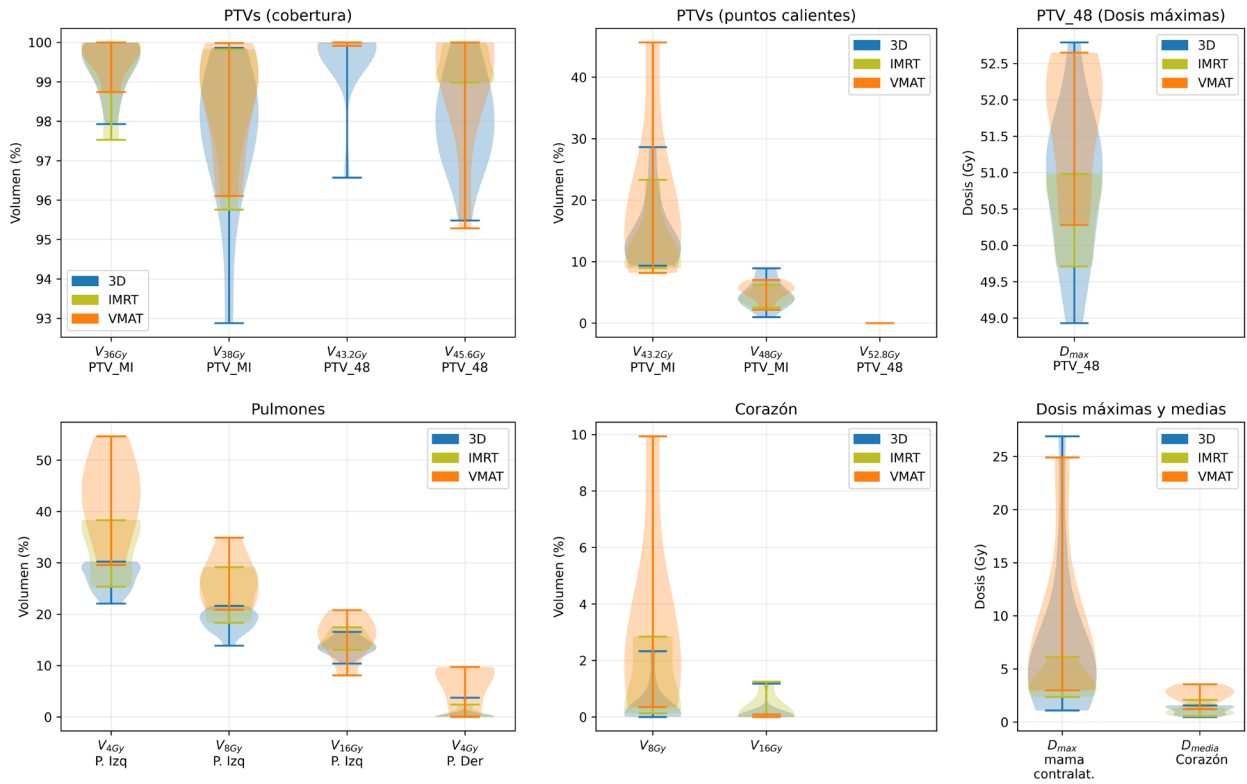


Fig. 8. Comparativa de los distintos criterios dosimétricos del estudio frente a la técnica de tratamiento para la simulación en IF (N = 24).

Tabla 3. Valores mediana de los distintos criterios dosimétricos para técnicas 3D, IMRT y VMAT planificados sobre el estudio correspondiente a IF (N = 24). Sólo se muestran los resultados para los criterios dosimétricos que han superado la prueba de Kruskal-Wallis. Los datos en **negrita** corresponden con valores *p* menores o iguales a 0.05.

Estructura	Criterio dosimétrico	Medianas y <i>p</i> Kruskal-Wallis				Diferencia de medianas y <i>p</i> Mann-Whitney U					
		3D	IMRT	VMAT	<i>p</i>	IMRT - 3D	<i>p</i>	VMAT - 3D	<i>p</i>	VMAT - IMRT	<i>p</i>
Pulmón izquierdo	V8Gy (%)	19.1	25.9	26.3	0.005	6.8	0.095	7.2	< 0.001	0.4	0.429
	V4Gy (%)	27.5	36.5	43.1	0.004	9.0	0.143	15.7	< 0.001	6.7	0.052
Corazón	Dmedia (Gy)	1.2	0.9	2.7	0.007	-0.2	0.924	1.5	0.002	1.8	0.009

Tabla 4. Valores mediana de los distintos criterios dosimétricos para técnicas 3D, IMRT y VMAT planificados sobre el estudio correspondiente a RL (N = 24). Sólo se muestran los resultados para los criterios dosimétricos que han superado la prueba de Kruskal-Wallis. Los datos en **negrita** corresponden con valores *p* menores o iguales a 0.05.

Estructura	Criterio dosimétrico	Medianas y <i>p</i> Kruskal-Wallis				Diferencia de medianas y <i>p</i> Mann-Whitney U					
		3D	IMRT	VMAT	<i>p</i>	IMRT - 3D	<i>p</i>	VMAT - 3D	<i>p</i>	VMAT - IMRT	<i>p</i>
Pulmón izquierdo	V8Gy (%)	23.6	31.8	27.8	0.015	8.2	0.173	4.3	0.001	-4.0	0.931
Corazón	V8Gy (%)	1.7	3.5	4.0	0.041	1.8	0.246	2.3	0.012	0.5	0.429
	Dmedia (Gy)	1.9	1.4	3.2	0.005	-0.5	0.566	1.3	< 0.001	1.8	0.082

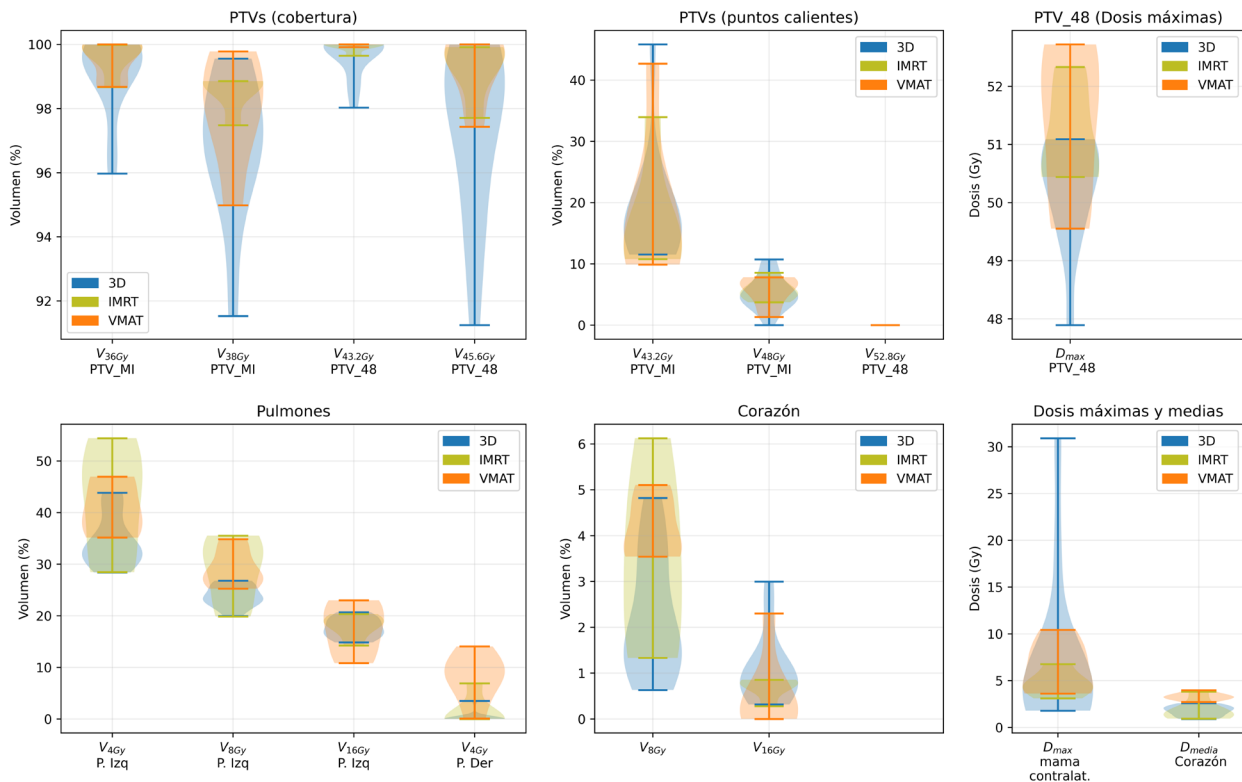


Fig. 9. Comparativa de los distintos criterios dosimétricos del estudio frente a la técnica de tratamiento para la simulación en RL (N = 24).

Además, el corazón muestra diferencias significativas en los volúmenes a 16 Gy y 8 Gy, así como en la dosis media, siendo estos valores más altos en RL.

4.4.2. Valores del DVH vs. técnica de tratamiento utilizada

En esta sección se comparan los valores de los distintos criterios dosimétricos de la tabla 1 según la técnica de irradiación empleada.

Las fig. 8 y fig. 9 muestran las comparaciones de estos criterios dosimétricos entre las distintas técnicas para la simulación en IF y RL, respectivamente. En este análisis se han incluido un total de 24 planificaciones. De estas, 13 corresponden a planificaciones realizadas con técnica de irradiación 3DCRT, 5 con IMRT y 6 con VMAT.

Las tablas 3 y 4, muestran las diferencias estadísticamente significativas que se han encontrado en el análisis.

En el caso de IF (tabla 3), los análisis realizados con la prueba U de Mann-Whitney indican diferencias significativas entre las técnicas de irradiación en varios criterios dosimétricos. En la comparación entre VMAT

y 3D, se observan diferencias estadísticamente significativas en los parámetros V4Gy y V8Gy de pulmón izquierdo, siendo superiores los volúmenes irradiados con VMAT en ambos casos. En la comparativa entre 3D e IMRT, las diferencias encontradas no tienen significación estadística, no obstante, el valor de la mediana para V4Gy y V8Gy es inferior para 3D.

En cuanto a la dosis media en el corazón, se encuentran diferencias significativas tanto entre VMAT y 3D como entre VMAT e IMRT, con valores de dosis media más altos en VMAT en comparación con las otras dos técnicas. Por otro lado, no se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre IMRT y 3D en ninguno de los criterios analizados.

En condiciones de RL (tabla 4), se observan diferencias significativas entre las técnicas de irradiación en varios criterios dosimétricos, según los resultados de la prueba U de Mann-Whitney. Para el V8Gy de pulmón izquierdo, se observa una diferencia significativa entre VMAT y 3D, con valores más bajos para 3D. No obstante, no se encontraron diferencias significativas entre IMRT y 3D ni entre VMAT e IMRT. En el criterio V8Gy de corazón, se presentan diferencias significativas entre VMAT y 3D, donde en este caso 3D vuelve a presentar valores más bajos.

En cuanto a la dosis media en el corazón, se detectan diferencias significativas entre VMAT y 3D, siendo VMAT la técnica con mayores valores de dosis media. Sin embargo, entre IMRT y 3D y entre VMAT e IMRT, no se hallaron diferencias estadísticamente significativas en ninguno de los criterios analizados.

4.4.3. Valores del DVH vs. experiencia en planificación de tratamientos de mama

Los valores del DVH se analizaron también en función de la experiencia previa en planificación de tratamientos de mama, comparando las planificaciones realizadas por alumnos con menos de 10 tratamientos frente a aquellos con 10 o más. Las fig. 10 y 11 ilustran gráficamente los resultados obtenidos para condiciones de IF y RL, respectivamente. De las 24 planificaciones evaluadas en este apartado, 13 corresponden a estudiantes con menos de 10 tratamientos planificados y 11 a aquellos con 10 o más.

Aplicando la prueba U de Mann-Whitney a los datos de IF y RL, sólo se obtiene un resultado en el cual la diferencia entre grupos resulta estadísticamente significativa. Se trata del caso de IF y el parámetro V16Gy del pulmón izquierdo, donde se observa una diferencia

en la mediana de 1.8% a favor del grupo con mayor experiencia, con un valor p de 0.049.

5. Discusión

5.1. Limitaciones del estudio

Los planes de tratamiento elaborados por cada participante se realizaron sobre los mismos estudios de CT de la paciente (RL, IF). Sin embargo, al incorporarlos al sistema de planificación propio de cada centro, se aplicó la función de calibración CT/ED o CT/MD correspondiente al CT utilizado en cada institución. Este aspecto puede ser una fuente de dispersión de los resultados obtenidos.

Se esperaba mayor participación por parte de los estudiantes. Algunos de los estudiantes que participaron en el módulo 4 no enviaron datos por lo que no han participado en el estudio, otros han enviado el formulario incompleto y otros han enviado los datos en formato no adecuado.

La escasa diferencia observada entre las planificaciones realizadas por los alumnos más experimentados y los menos, puede deberse a que los menos experi-

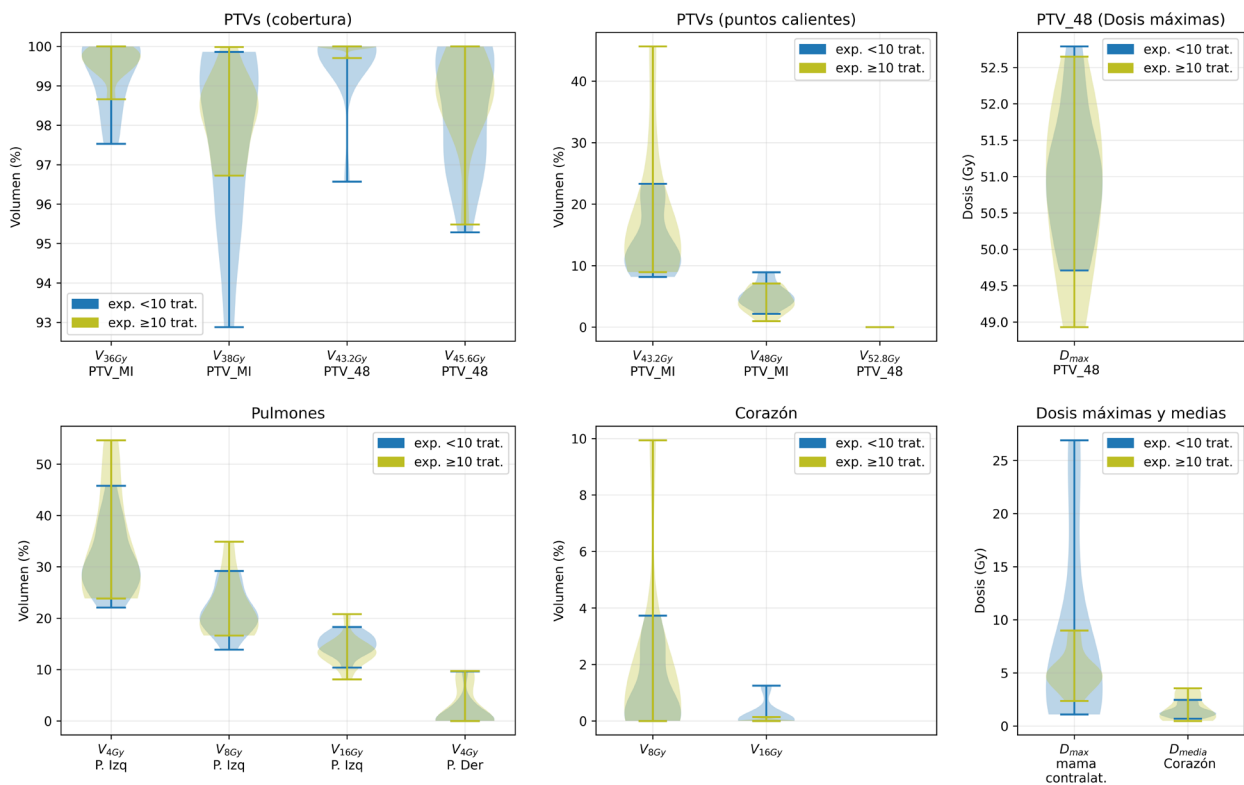


Fig. 10. Comparativa de los distintos criterios dosimétricos indicados en el ensayo clínico RTOG 1005 en función de la experiencia previa del alumno, para simulación en IF (N = 24).

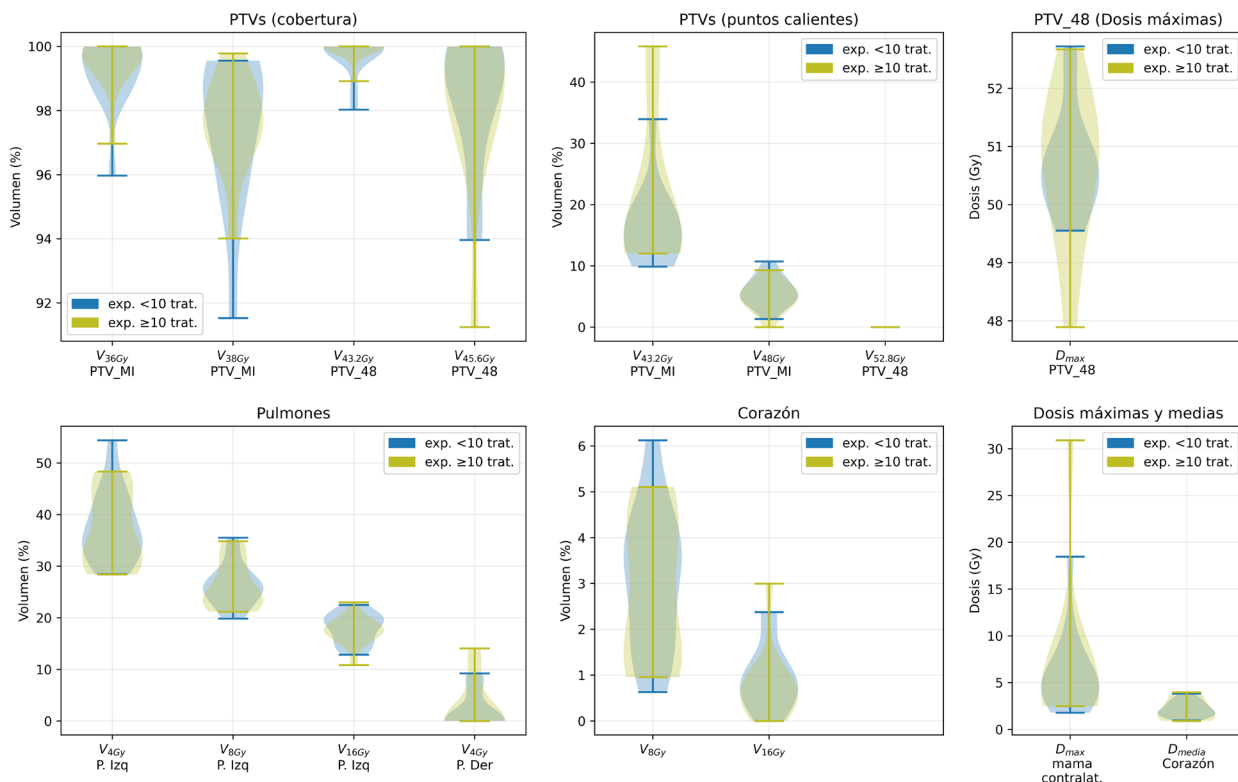


Fig. 11. Comparativa de los distintos criterios dosimétricos indicados en el ensayo clínico RTOG 1005 en función de la experiencia previa del alumno, para simulación en RL (N = 24).

mentados han solicitado ayuda de otros compañeros con más experiencia antes de realizar el ejercicio. En cualquier caso, para poder determinar cuál es la mejor técnica, probablemente sería necesario repetir el ejercicio por personal experimentado y más homogéneo y con una cantidad de participantes mayor.

5.2. Comparativa con la literatura

La realización completa del ejercicio ha sido realizada por la mayoría de los participantes (35 de 43), si bien dos de ellos no consiguieron alcanzar un resultado aceptable para su tratamiento clínico. Esto contrasta con el éxito en la consecución de los objetivos de otros estudios similares,¹ en los que se alcanzó un 100% de éxito entre los participantes. Esta diferencia podría deberse a que los participantes de este curso suelen estar en su primer o segundo año de residencia, y aún no han completado la mitad de su período formativo. Además, es posible que no se haya coordinado adecuadamente con las unidades docentes de procedencia para garantizar que un experto les proporcionara previamente una explicación sobre el uso del equipamiento disponible en su hospital, como se hizo

en el estudio de referencia. Las restricciones de dosis correspondientes a RTOG 1005 se han conseguido en la mayoría de los casos, salvo para la mama contralateral, donde la dosis máxima se recomienda que no sobrepase 2.64 Gy. Otros estudios también han constatado la dificultad para alcanzar esta restricción de dosis²² y han determinado que la técnica 3DCRT^{23,24} es la que presenta más dificultad en conseguir cumplir este requerimiento.

Respecto a las técnicas de simulación, podemos comentar que DEGRO recomienda el uso de la IF para reducir la dosis en el corazón si se trata de la mama izquierda,¹⁹ lo que está en coincidencia con nuestros resultados, en los que se puede observar que existe una diferencia estadísticamente significativa para una mejor cobertura y menores dosis a los OARs (V_{16Gy} , V_{8Gy} y V_{4Gy} para pulmón y V_{16Gy} , V_{8Gy} y dosis media en el corazón en tabla 2 y fig. 7) si se utiliza IF. No obstante, en nuestro estudio no se ha valorado la variabilidad en el posicionamiento diario si se usa inspiración forzada y los resultados hacen referencia a una única paciente, cuya anatomía permite una separación considerable del corazón al utilizar IF a la vez que un aumento importante del volumen del pulmón.

6. Conclusiones

Los profesores del módulo 4 del Diploma de Experto en Fundamentos de Física Médica 2023-2024, organizado por la SEFM y la UNIA, hemos propuesto un ejercicio para demostrar el aprendizaje de las competencias en la planificación de tratamientos de radioterapia que ha sido realizado con éxito por la mayoría de los alumnos. Los resultados obtenidos permiten deducir que, tras el curso, la gran mayoría de los residentes son capaces de realizar una planificación de una paciente con cáncer de mama, aunque los residentes con menos experiencia han requerido ayuda de otros compañeros de sus unidades docentes. Este ejercicio les ha permitido apreciar la mejora en el tratamiento introducida por la técnica de IF, que en la totalidad de los casos ha permitido reducir la dosis a los OARs (pulmón y corazón) sin comprometer la cobertura de los PTVs.

Asimismo, se ha reflejado la variedad de disponibilidad de equipamiento y sistemas de planificación de las distintas unidades docentes.

De las técnicas empleadas, las planificaciones en 3D han mostrado, en general, los volúmenes más reducidos de pulmón y corazón irradiados a bajas dosis (V8Gy y V4Gy para pulmón izquierdo, y V8Gy para corazón), y la dosis media en corazón significativamente menor manteniendo coberturas similares de los PTVs.

En condiciones de IF, se observaron diferencias estadísticamente significativas en los parámetros V8Gy y V4Gy del pulmón izquierdo, así como en la dosis media en el corazón, con valores más elevados en VMAT en comparación con 3D. Además, VMAT presentó también mayores dosis medias en el corazón frente a IMRT. En condiciones de RL, se hallaron diferencias significativas en V8Gy de pulmón izquierdo, así como en V8Gy y en la dosis media en el corazón entre VMAT y 3D, siendo de nuevo VMAT la técnica con valores más altos.

Los resultados obtenidos en este trabajo han permitido recopilar datos de interés relevantes para los profesionales del ámbito de la física médica. Este material constituye un recurso docente valioso que puede ser de utilidad para las unidades docentes en la formación de su personal, tanto de residentes de radiofísica como de técnicos dosimetrías.

Además, se ha evidenciado la existencia de múltiples enfoques en la planificación del tratamiento del cáncer de mama y las diferencias que se pueden obtener para un mismo paciente según la técnica empleada. Este hallazgo resalta la importancia de establecer criterios uniformes de evaluación y comparación.

Por último, cabe destacar que este primer caso práctico se plantea como el origen de una posible base de datos anonimizada en línea y multiinstitucional. Dicha base de datos, cumpliendo todos los requisitos legales y éticos, podría convertirse en una herramienta

formativa muy útil para mejorar la formación de los residentes. Esto resulta especialmente relevante dado que su formación se realiza esencialmente en una única unidad docente. Contar con una base de datos validada por un grupo de expertos y enriquecida por la experiencia de años anteriores podría ofrecerles una visión más amplia sobre cómo se aborda esta técnica en diferentes unidades docentes.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la paciente que ha cedido sus datos y a todos los centros participantes. Sus esfuerzos y colaboración han sido fundamentales para el éxito de esta investigación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses relacionados con la investigación presentada en este artículo.

Información de contacto

Para obtener más información sobre este estudio o para colaborar en futuras investigaciones, por favor contacte con Antonio López Medina en antonio.lopez.medina@sergas.es.

Bibliografía

1. Roumeliotis M, Morrison H, Conroy L, et al. Competency-Based Medical Education in Radiation Therapy Treatment Planning. *Pract Radiat Oncol* 2022;12(3):e232–e238; doi: 10.1016/j.prro.2021.12.003.
2. Colmenares R, Angulo-Paín E, Brualla-González L, et al. Medical Physics in Spain: Current status and challenges. *Medical Physics International* 2021; 9(2) (<https://www.efomp.org/uploads/c81540e6-c95d-4ae0-ba3b-844714aba9e/MPI-2021-02.pdf>)
3. Garibaldi C, Essers M, Heijmen B, et al. The 3rd ESTRO-EFOMP core curriculum for medical physics experts in radiotherapy. *Radiother Oncol* 2022;170:89–94; doi: 10.1016/j.radonc.2022.02.012.
4. Moideen N, De Metz C, Kalyvas M, et al. Aligning Requirements of Training and Assessment in Radiation Treatment Planning in the Era of Competency-Based Medical Education. *Int J Radiat Oncol* 2020;106(1):32–36; doi: 10.1016/j.ijrobp.2019.10.005.
5. Fiorino C, Guckenberger M, Schwarz M, et al. Technology-driven research for radiotherapy innovation. *Mol Oncol* 2020;14(7):1500–1513; doi: 10.1002/1878-0261.12659.
6. García Romero A, Hernández Masgrau V, Baeza Trujillo M, et al. Resultados de la encuesta de la Sociedad Española de Física Médica sobre de control de calidad de sistemas de

- planificación de tratamientos en el ámbito de haces de fotones y electrones de radioterapia externa. *Rev Física Médica* 2021;2(22):55–66; doi: 10.37004/sefm/2021.22.2.006.
7. Bortfeld T. IMRT: a review and preview. *Phys Med Biol* 2006;51(13):R363–R379; doi: 10.1088/0031-9155/51/13/R21.
 8. Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Med Phys* 2008;35(1):310–317; doi: 10.1118/1.2818738.
 9. Zhang Q, Liu J, Ao N, et al. Secondary cancer risk after radiation therapy for breast cancer with different radiotherapy techniques. *Sci Rep* 2020;10(1):1220; doi: 10.1038/s41598-020-58134-z.
 10. Racka I, Majewska K, Winięcki J. Three-dimensional conformal radiotherapy (3D-CRT) vs. volumetric modulated arc therapy (VMAT) in deep inspiration breath-hold (DIBH) technique in left-sided breast cancer patients—comparative analysis of dose distribution and estimation of projected secondary cancer risk. *Strahlenther Onkol* 2023;199(1):90–101; doi: 10.1007/s00066-022-01979-2.
 11. Koivumäki T, Heikkilä J, Väänänen A, et al. Flattening filter free technique in breath-hold treatments of left-sided breast cancer: The effect on beam-on time and dose distributions. *Radiother Oncol* 2016;118(1):194–198; doi: 10.1016/j.radonc.2015.11.032.
 12. Heikkilä A, Boman E, Rossi M, et al. Dosimetric effect of rotational setup errors in volumetric modulated arc therapy and field-in-field treatment of left-sided breast cancer. *Phys Med* 2024;117:103203; doi: 10.1016/j.ejmp.2023.103203.
 13. Koivumäki T, Fogliata A, Zeverino M, et al. Dosimetric evaluation of modern radiation therapy techniques for left breast in deep-inspiration breath-hold. *Phys Med* 2018;45:82–87; doi: 10.1016/j.ejmp.2017.12.009.
 14. Mankinen M, Virén T, Seppälä J, et al. Dosimetric effect of respiratory motion on planned dose in whole-breast volumetric modulated arc therapy using moderate and ultra-hypofractionation. *Radiat Oncol* 2022;17(1):46; doi: 10.1186/s13014-022-02014-5.
 15. Huijskens S, Granton P, Fremeijer K, et al. Clinical practicality and patient performance for surface-guided automated VMAT gating for DIBH breast cancer radiotherapy. *Radiother Oncol* 2024;195:110229; doi: 10.1016/j.radonc.2024.110229.
 16. Meattini I, Becherini C, Boersma L, et al. European Society for Radiotherapy and Oncology Advisory Committee in Radiation Oncology Practice consensus recommendations on patient selection and dose and fractionation for external beam radiotherapy in early breast cancer. *Lancet Oncol* 2022;23(1):e21–e31; doi: 10.1016/S1470-2045(21)00539-8.
 17. Hurkmans C, Duisters C, Peters-Verhoeven M, et al. Harmonization of breast cancer radiotherapy treatment planning in the Netherlands. *Tech Innov Patient Support Radiat Oncol* 2021;19:26–32; doi: 10.1016/j.tipsro.2021.06.004.
 18. Milligan MG, Zieminski S, Johnson A, et al. Target coverage and cardiopulmonary sparing with the updated ESTRO-ACROP contouring guidelines for postmastectomy radiation therapy after breast reconstruction: a treatment planning study using VMAT and proton PBS techniques. *Acta Oncol* 2021;60(11):1440–1451; doi: 10.1080/0284186X.2021.1957499.
 19. Breast Cancer Expert Panel of the German Society of Radiation Oncology (DEGRO), Duma M-N, Baumann R, et al. Heart-sparing radiotherapy techniques in breast cancer patients: a recommendation of the breast cancer expert panel of the German society of radiation oncology (DEGRO). *Strahlenther Onkol* 2019;195(10):861–871; doi: 10.1007/s00066-019-01495-w.
 20. Radiation Therapy Oncology Group. A Phase III Trial of Accelerated Whole Breast Irradiation With Hypofractionation Plus Concurrent Boost Versus Standard Whole Breast Irradiation Plus Sequential Boost for Early-Stage Breast Cancer. Clinical trial registration. [clinicaltrials.gov](https://clinicaltrials.gov/NCT01349322) NCT01349322; 2024.
 21. Offersen BV, Boersma LJ, Kirkove C, et al. ESTRO consensus guideline on target volume delineation for elective radiation therapy of early stage breast cancer. *Radiother Oncol* 2015;114(1):3–10; doi: 10.1016/j.radonc.2014.11.030.
 22. Chen G-P, Liu F, White J, et al. A planning comparison of 7 irradiation options allowed in RTOG 1005 for early-stage breast cancer. *Med Dosim* 2015;40(1):21–25; doi: 10.1016/j.meddos.2014.06.007.
 23. Li XA, Moughan J, White JR, et al. Patterns of Failure Observed in the 2-Step Institution Credentialing Process for NRG Oncology/Radiation Therapy Oncology Group 1005 (NCT01349322) and Lessons Learned. *Pract Radiat Oncol* 2020;10(4):265–273; doi: 10.1016/j.prro.2019.11.007.
 24. Rago M, Placidi L, Polsoni M, et al. Evaluation of a generalized knowledge-based planning performance for VMAT irradiation of breast and locoregional lymph nodes—Internal mammary and/or supraclavicular regions. *PLOS ONE* 2021;16(1):e0245305; doi: 10.1371/journal.pone.0245305.

VersaHD.

Powered by high definition dynamic radiosurgery.

Versa HD™ with Monaco® gives you the clinical flexibility of high definition dynamic radiosurgery (HDRS) and conventional RT in a single platform. HDRS means you can deliver stereotactic treatments within standard RT time slots, regardless of anatomy or complexity. And, with advanced image guidance tools and up to 5x less transmission to non-targeted regions, you have assurance of end-to-end precision.

Discover how Versa HD can help you meet operational efficiencies while achieving better outcomes for patients.

elekta.com/VersaHD



Focus where it matters.

4513 371 1539 03.17

 Elekta