



**Implementación de la planeación de cáncer de próstata
mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización
multicriterio en un hospital público de mediana y alta
complejidad del suroccidente colombiano, 2023**

Presentado por:

Vaneza Yasmin Criollo Narvaez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas

Departamento de Física

2024



**Implementación de la planeación de cáncer de próstata
mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización
multicriterio en un hospital público de mediana y alta
complejidad del suroccidente colombiano, 2023**

Presentado por:

Vaneza Yasmin Criollo Narvaez

Trabajo final de Maestría presentado como requisito para optar al título de:

Magíster en Física Médica

Director:

Físico Médico Diego Mauricio Orejuela Mosquera, M.Sc, MBA Salud

Co-director:

Ph.D. y P.D. María Cristina Plazas de Pinzón

Línea de investigación:

Radioterapia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas

Departamento de Física

2024



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo está dedicado a mi padre, mi mayor fuente de inspiración, aunque ya no esté presente físicamente su amor continúa guiándome en cada paso de mi vida, a mi madre por su amor, dedicación y apoyo incondicional, a mi hermana por ser mi compañera de vida, mi confidente y regalarme a un ser tan maravilloso como lo es mi sobrina, a mi hermano por su apoyo y cariño.

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios por la salud y la vida, además por la oportunidad de realizar mis prácticas hospitalarias en tan prestigiosa institución como lo es el Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E”. Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia por permitirme llevar a cabo uno de mis proyectos universitarios de la mano de profesionales que me aportaron sus conocimientos como lo fue el profesor y director del presente trabajo el M.Sc. Físico Médico Diego Mauricio Orejuela, quien estuvo presto a compartir su vivencias y conocimientos desde el primer día en que inicie mi proceso práctico, por su paciencia y dedicación. A la profesora y a la vez codirectora Ph.D. María Cristina Plazas por hacer parte de este proceso. Mi gratitud hacia el Físico Médico Juan Sebastián Estepa y a mi compañero de práctica Adrián David Ordoñez por apoyarme y brindarme su confianza en el transcurso de este recorrido. Agradezco a cada uno de los profesionales que hacen parte del servicio de radioterapia, puesto que, cada uno de ellos aportaron un granito de arena que hoy se ve reflejado en la culminación de una etapa de crecimiento profesional y personal, a mi familia por apoyarme incondicionalmente y por creer en mí.



RESUMEN

Implementación de la planeación de cáncer de próstata mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización multicriterio en un hospital público de mediana y alta complejidad del suroccidente colombiano, 2023

En el presente trabajo se presenta la implementación de la planeación de tratamiento de cáncer de próstata mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización multicriterio. Se trata de un estudio descriptivo de retrospectivo. La población de estudio fue constituida por registros de planes de tratamiento con radioterapia para pacientes diagnosticados con cáncer de próstata, durante el periodo del 01 de enero de 2020 a hasta el 30 de junio de 2023, con un total de 170 registros. Para llevar a cabo el estudio, se constituyeron 2 grupos: el primero formado por 140 registros, que fueron usados en el entrenamiento del modelo basado en el conocimiento, mientras los 30 registros restantes se definieron para realizar la validación del funcionamiento del modelo. La investigación se estableció en aras de determinar si los planes generados con el modelo basado en el conocimiento logran mejorar o mantener los criterios de calidad respecto al plan inicial. Para dar respuesta a dicha inquietud, inicialmente se planteó una descripción de variables demográficas (edad, estadio, dosis de prescripción, entre otras), y por otro lado se analizaron de forma independiente las variables que constituyen la categoría de calidad de planeación, entre las cuales se encuentran: estimación de los constraints para los órganos en riesgo, determinación del cumplimiento de estos criterios, evaluación de los índices de homogeneidad y conformidad, y análisis del índice gamma.

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron en el presente trabajo se logró observar que el modelo de planeación (RP+MCO) logró generar planes de alta calidad, obteniendo mejorías más notorias para algunos órganos, como bulbo peneano, cabezas femorales, médula y vejiga. Sin embargo, para el recto se obtienen métricas que incrementan (detrimento) respecto a los valores de los planes iniciales. Además, el mejoramiento de los planes se puede determinar a través de la puntuación global, con la que se logran categorizarlos como óptimos o aceptables. Al mejorar las métricas el modelo logra cambiar de categoría a cierta cantidad de planes, y en la etapa de validación se logra subir de nivel a 7 registros, representando una disminución de dosis en los órganos en riesgo y una mayor cobertura de los volúmenes objetivo. Por otra parte, se obtuvieron planes con altos índices de homogeneidad y conformidad (superando a los planes iniciales). Finalmente, en la evaluación de la calidad de planeación para los planes de validación se tuvo un cumplimiento del 100.0% de los índices de alta calidad.

Palabras clave: Planeación basada en el conocimiento (KBP), optimización multicriterio (MCO), calidad de planeación, cáncer de próstata.



ABSTRACT

Implementation of prostate cancer planning through a model based on knowledge and multi-criteria optimization in a medium and high complexity public hospital in southwestern Colombian, 2023.

This study presents the implementation of prostate cancer treatment planning using a model of knowledge-based multicriteria optimization. This is a retrospective descriptive study. The study population was constituted by registers of radiotherapy treatment plans for patients diagnosed with prostate cancer, during the period from January 01, 2020 to June 30, 2023, with a total of 170 registers. To develop the study, 2 groups were constituted: the first consisted of 140 records, which were used in the training of the knowledge-based model, while the remaining 30 records were defined to perform the validation of the model's performance. The research was established in order to determine whether the plans generated with the knowledge-based model manage to improve or maintain the quality criteria with respect to the initial plan. In order to respond to this concern, a description of demographic variables (age, stage, prescription dose, among others) was initially proposed, and on the other hand, the variables that constitute the planning quality category were analyzed independently, among which are: estimation of the constraints for the organs at risk, determination of compliance with these criteria, evaluation of the homogeneity and conformity indexes, and analysis of the gamma index.

According to the results obtained in this study, it was observed that the planning model (RP+MCO) was able to generate high quality plans, obtaining more significant improvements for some organs, such as the penile bulb, femoral heads, spinal cord and bladder. However, for the rectum, metrics are obtained that increase (detriment) with respect to the values of the initial plans. Additionally, the improvement of the plans can be determined through the global score, with which they can be categorized as optimal or acceptable. By improving the metrics, the model is able to change the category of a number of plans, and in the validation stage it is possible to increase the level to 7 records, representing a decrease in doses in the organs at risk and a greater coverage of the target volumes. On the other hand, plans with high homogeneity and conformity indexes were obtained (surpassing the initial plans). Finally, in the evaluation of the quality of planning for the validation plans, there was 100.0% compliance with the high-quality indexes.

Keywords: Knowledge-based planning (KBP), Multi-Criteria Optimization (MCO), planning quality, prostate cancer.



TABLA DE CONTENIDO

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
2	JUSTIFICACIÓN.....	4
3	ESTADO DEL ARTE.....	5
4	MARCO TEÓRICO.....	11
4.1	MARCO CONCEPTUAL	11
4.1.1	<i>Cáncer de próstata</i>	<i>11</i>
4.1.2	<i>Estadificación del cáncer de próstata</i>	<i>12</i>
4.1.3	<i>Definición de volúmenes.....</i>	<i>15</i>
4.1.4	<i>La planificación de un tratamiento.....</i>	<i>16</i>
4.1.5	<i>Histograma dosis volumen (DVH).....</i>	<i>17</i>
4.1.6	<i>Refuerzo secuencial y refuerzo integrado simultáneamente (SIB)</i>	<i>17</i>
4.1.7	<i>Algoritmos de cálculo.....</i>	<i>18</i>
4.1.8	<i>Planificación inversa.....</i>	<i>19</i>
4.1.9	<i>Inteligencia artificial (IA):</i>	<i>21</i>
4.1.10	<i>El aprendizaje automático</i>	<i>22</i>
4.1.11	<i>Herramientas de optimización avanzadas.....</i>	<i>22</i>
4.1.12	<i>Planificación basada en el conocimiento.....</i>	<i>22</i>
4.1.13	<i>RapidPlan.....</i>	<i>23</i>
4.1.14	<i>Optimización Multicriterio (MCO)</i>	<i>26</i>
4.1.15	<i>Prescripción de dosis de tratamiento.....</i>	<i>27</i>
4.2	MARCO CONTEXTUAL	29
4.3	MARCO NORMATIVO.....	31
4.4	MARCO TEÓRICO	32
4.4.1	<i>Índice de conformidad (IC)</i>	<i>32</i>
4.4.2	<i>Índice de homogeneidad (IH).....</i>	<i>33</i>
4.4.3	<i>Índice de evaluación Gamma</i>	<i>34</i>
4.4.4	<i>Constraints para la evaluación de OAR's</i>	<i>36</i>
4.4.5	<i>Puntuación de planeación</i>	<i>37</i>
5	OBJETIVOS	39
5.1	OBJETIVO GENERAL	39
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
6	METODOLOGÍA.....	40
6.1	TIPO DE ESTUDIO	40
6.2	ÁREA DE ESTUDIO.....	40
6.3	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	40
6.3.1	<i>Población objeto.....</i>	<i>40</i>
6.3.2	<i>Población de estudio</i>	<i>41</i>
6.3.3	<i>Criterios de inclusión</i>	<i>41</i>
6.3.4	<i>Criterios de exclusión.....</i>	<i>41</i>
6.4	MUESTRA	42
6.4.1	<i>Variables.....</i>	<i>42</i>



6.5	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	46
6.6	PLAN DE ANÁLISIS	46
6.6.1	<i>Flujograma del método de análisis</i>	48
6.6.2	<i>Fortalezas y limitaciones</i>	48
6.6.3	<i>Control de sesgos</i>	49
6.7	CONSIDERACIONES ÉTICAS	50
6.8	CONFLICTOS DE INTERÉS	50
7	RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	51
7.1	DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DEMOGRÁFICAS	51
7.2	DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DE CALIDAD DE PLANEACIÓN	56
7.2.1	<i>Etapas de verificación</i>	56
7.2.2	<i>Etapas de validación</i>	84
7.3	DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL PLAN DE TRATAMIENTO	103
7.3.1	<i>Evaluación de la calidad de los planes de verificación</i>	103
7.3.2	<i>Evaluación de la calidad de los planes de validación</i>	105
8	CONCLUSIONES	107
9	REFERENCIAS.....	109
10	ANEXOS	113



1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial el cáncer es una de las principales causas de muerte. En el año 2020 se registraron alrededor de 10 millones de defunciones de acuerdo con el reporte de la OMS. Se considera una cifra alarmante, debido a que de cada seis personas que son diagnosticadas con esta enfermedad una de éstas muere. Dentro de los tipos de cáncer más comunes a nivel mundial presentados por la OMS son: mama, pulmón, recto y próstata. Por otra parte, a nivel nacional este problema de salud no es ajeno, de acuerdo con las cifras presentadas por el Ministerio de Salud de Colombia se estima que en el año 2020 se presentaron 47 710 muertes debido a este tipo de patología, con una tasa de mortalidad de 94.7 por cada 100 000 habitantes, de igual forma acorde con los datos que reporta el Ministerio de Salud de Colombia los cinco tipos de cáncer más comunes en el país son: mama, próstata, colon y recto, estómago y pulmón. [1], [2]

El cáncer de próstata se trata del crecimiento maligno de la glándula prostática, esta clase de enfermedad es la más común en hombres, constituyendo la segunda causa de mortalidad por cáncer en la población masculina y su aparición se relaciona directamente con la edad, por lo tanto; a mayor edad mayor probabilidad de padecer esta afección, en Colombia uno de cada tres hombres mayores a 50 años padece este tipo de cáncer. [3] Anualmente se estiman en el país 8 872 casos nuevos de cáncer de próstata y una tasa de incidencia ajustada de 46.5 por cada 100 000 habitantes, mientras que en el departamento del Valle del Cauca se tiene una tasa anual equivalente (TAE) de 59.8 afectados por cada 100 000 habitantes, entre el año 2007 y 2011. [4]

El tratamiento del cáncer de próstata se efectúa a través de diferentes modalidades de terapia, entre las cuales se encuentran: cirugía, extirpación del tumor o del tejido afectado; quimioterapia, uso de fármacos para destruir las células cancerosas; braquiterapia, inserción de fuentes radiactivas directamente en la próstata; hormonoterapia, reducción de los niveles de testosterona en el organismo, eliminación de hormonas o bloquea su acción y a la vez impide la multiplicación de células cancerosas; conducta expectante o vigilancia activa, observación minuciosa del estado del paciente sin administrar ningún tipo de tratamiento mientras no presente signos o síntomas o estos cambien, y radioterapia, uso de energías ionizantes para destruir células cancerígenas y reducir el tamaño de los tumores, su aplicación depende de la categoría del cáncer, localización y el grado de avance de la enfermedad [1], estas clases de procedimientos se han estudiado y perfeccionado al transcurrir del tiempo para reducir la mortalidad, morbilidad e incidencia de esta enfermedad a nivel mundial, internacional y regional. La modalidad de tratamiento de radioterapia se define como el uso de radiación de alta energía principalmente de rayos X, para la destrucción de las células cancerígenas y así mismo disminuir el tamaño de los tumores, además el uso de las radiaciones ionizantes en el tratamiento conlleva a probabilidades de provocar efectos secundarios en el paciente, por lo tanto, se implementó la administración de las altas dosis en fracciones y no en una única dosis. Adicionalmente, los diferentes planes de tratamiento



requieren de una planeación especializada y un aseguramiento de estándares de alta calidad. [5]

La radioterapia es una modalidad que emplea técnicas de tratamiento para maximizar el control del cáncer y minimizar la toxicidad que es causada a los órganos que no poseen la afección, dentro de las cuales se encuentra la radioterapia de intensidad modulada (IMRT) y la terapia de arco volumétrico modulado (VMAT), éstas se clasifican como técnicas de planificación inversa con las cuales se puede optimizar la dosis tanto para los volúmenes objetivos (PTV) como para los órganos a riesgo (OAR), sin embargo, este tipo de planificación tiene desventajas, dado que el proceso de optimización conlleva un periodo de tiempo largo, ya que, el personal encargado de diseñar los planes determina los criterios deseados para el objetivo y los OAR siguiendo un proceso de prueba y error de forma repetida, de igual forma no se tiene conocimiento de los histogramas dosis-volumen (DVH) alcanzables en el momento anterior a la optimización. [6]

Una de las principales dificultades que se evidencia en la implementación de los planes de tratamiento para cada paciente es el tiempo que se tarda en generarlos, por lo tanto; se han realizado varias investigaciones por diversos autores sobre métodos con los cuales se pueda optimizar el tiempo de planeación, desde la década de 1980 se ha indagado respecto a la implementación de sistemas de tratamiento basados en la planificación automática, con el fin de contribuir en el diseño de planes usando algoritmos que ayuden a automatizar las repetitivas y tediosas manipulaciones manuales, de acuerdo con los avances tecnológicos dichas técnicas han ido evolucionando de forma positiva. [7] Algunos softwares importantes que cumplen con estos objetivos son la planificación basada en el conocimiento (KBP) y la optimización multicriterio (MCO). Su implementación dentro de la práctica se ha realizado de forma individual, sin embargo; si cada uno de ellos por su parte presentan resultados suficientemente optimizados, implementar un modelo donde se usen estas dos modalidades es una alternativa prometedora y muy poco explorada, que puede conllevar a una optimización con mejores resultados, contribuyendo a la generación de planes de alta calidad y en el menor tiempo posible. [8]

A través de los años se han investigado diferentes modalidades para combatir el cáncer, estas se van modificando y sofisticando de la mano con los avances tecnológicos como lo ha sido la inteligencia artificial (IA) que contribuye de una forma positiva en la radioterapia oncológica, ya que, gracias a las bases de datos que contienen los diferentes planes de tratamiento se pueden entrenar programas o modelos que posteriormente son usados para predecir parámetros de optimización que juegan un papel importante para el planificador a la hora de realizar un plan. A pesar de los diversos avances de la radioterapia, la planificación de los tratamientos, actividad desarrollada fundamentalmente por los físicos médicos, actualmente sigue mostrando desafíos que conllevan a la búsqueda de nuevas técnicas u optimizar las existentes en pro de dar solución a esta problemática. La práctica con la que se ejecutan los planes clínicos aceptables conlleva un proceso bastante laborioso, ya que, en gran medida resulta ser elaborado manualmente y requiere de varias secuencias iterativas y pruebas de ensayo y error, buscando el ajuste adecuado de forma continua y



manual de los objetivos y los pesos dosimétricos. En radioterapia se han implementado varios softwares para realizar planes de tratamiento, sin embargo, presentan algunas limitaciones las cuales hacen que el tiempo de planificación sea bastante extenso el cual puede implicar desde una dedicación de horas hasta días, dependiendo de la complejidad del caso y la calidad de la dosimetría, en gran medida depende de la experiencia del profesional que realice la planificación del plan de tratamiento. Además, cada paciente tiene características únicas y se debe generar un plan individual, con la ayuda de estas herramientas se puede diseñar los planes para cada paciente nuevo, en un menor tiempo y con estándares de alta calidad, los cuales se ven reflejados en una disminución de la dosis en los órganos a riesgo y una mejor entrega de las dosis en los volúmenes objetivos. [9]

Pregunta de investigación: ¿La planeación basada en el conocimiento (KBP) combinada con la optimización multicriterio (MCO) en tratamientos de cáncer de próstata con radioterapia impactan significativamente en la calidad de los planes de tratamiento?

Uno de los grandes desafíos de la radioterapia es lograr entregar una dosis lo suficientemente alta al tejido afectado por células cancerígenas y al mismo tiempo buscar la mayor preservación del tejido sano, por tanto, se puede considerar como un problema de optimización, por consiguiente; en las últimas décadas los investigadores trabajan arduamente en la búsqueda de resolver dicha problemática de forma práctica y su respectiva aplicación en el ámbito clínico, una solución que se ha planteado para dar resolución a esta problemática es la implementación de la planificación automatizada, con la cual se busca generar planes de alta calidad de forma autónoma con la reducción de la interacción con el planificador. [10]



2 JUSTIFICACIÓN

El proyecto de investigación está encaminado en la implementación de un modelo de planeación basado en el conocimiento con la optimización multicriterio. La planeación de tratamientos es un proceso que está relacionado con varios factores que influyen en el desarrollo de esta misma, como por ejemplo la experiencia y la habilidad de la persona que ejecuta la actividad, considerando que es un proceso subjetivo de optimizaciones de prueba y error al buscar entregar la mayor dosis al target de forma homogénea y a la vez reducir la dosis que van a recibir los órganos en riesgo. Por otro lado, la inteligencia artificial ha tomado una gran relevancia en varias ramas de estudio y no es ajena al campo de la radioterapia. Las motivaciones para realizar la investigación son hacer uso la planeación basada en el conocimiento la cual se alimenta con planes de tratamiento previos de alta calidad para generar un modelo con el cual se puede predecir un rango de histogramas dosis volumen (DVH) de los órganos a riesgo (estimaciones de DVH) para cualquier paciente nuevo con características anatómicas similares a los pacientes de la base de datos del modelo. Mientras la optimización multicriterio ayuda a buscar soluciones adicionales para el mismo plan de tratamiento. El uso de estas herramientas para el entrenamiento de un modelo de planeación va dirigido en aras de reducir la variabilidad entre planificadores al disminuir la dependencia de la experticia en la elaboración de un plan y a la vez estandarizar dicho proceso, con la finalidad de entregar tratamientos de mayor calidad.



3 ESTADO DEL ARTE

La planificación basada en el conocimiento (KBP) está fundamentada en un conjunto de datos de planes de tratamiento clínico previos para una región determinada donde se encuentra el tumor específico para su posterior entrenamiento. La KBP utiliza algoritmos de aprendizaje automático para construir un modelo con el cual se logre predecir los objetivos de planificación específicos para el paciente nuevo que sean realistas y alcanzables. Por otra parte, la optimización multicriterio (MCO) es un proceso de planificación a través de la optimización que genera muchos planes diferentes (denominados planes de Pareto), en el que el planificador puede navegar y encontrar el mejor plan posible. Este proceso requiere de un conjunto de restricciones de dosis que deben cumplirse en todos los planes y un conjunto de objetivos; posteriormente, los objetivos de dosis son usados para generar los planes que se utilizan para la posterior navegación. Las restricciones de dosis deben contener al menos una función de dosis mínima y una función de dosis máxima, y se requieren al menos dos objetivos de dosis, que pueden ser definidas en un objetivo ideal (poco realista) para permitir un espacio navegable más amplio. Los planes generados con MCO permiten observar a los usuarios las compensaciones de los objetivos de planificación, y la disminución de la dosis en los OAR puede provocar el aumento de puntos calientes en otra región o estructura. Una vez que se haya alcanzado un objetivo de planificación, el panel de navegación de compensaciones permite bloquear para que no se generen más cambios en el objetivo que puedan resultar en la violación de este objetivo con navegaciones posteriores. A medida que aumenta el número de compensaciones OAR bloqueadas, disminuye el espacio de navegación, luego de que las compensaciones a OAR se ajustan y se establece la configuración deseada por el planificador, el plan de optimización se convierte en un plan de entrega. [8]

Diversos autores han realizado investigaciones con la finalidad de implementar modalidades de planificación basadas en el conocimiento (KBP) [11]. Su funcionamiento se centra en el uso de bases de datos de planes clínicos anteriores con los cuales se puede relacionar las variables geométricas propias de la anatomía de los pacientes y las distribuciones de la dosis, con las que posteriormente se obtiene la información respecto a la optimización de los planes para los nuevos pacientes. [11]

La planificación de tratamientos se ha ido sofisticando en las últimas décadas con la ayuda del avance de la informática, permitiendo a los planificadores diseñar planes de radioterapia complejos que resulta ser una actividad laboriosa que requiere un tiempo prolongado otorgado por parte del planificador para optimizar los casos de forma individual a través de un proceso de prueba y error. Una herramienta que se ha acogido recientemente es la inteligencia artificial, que se usa para automatizar y mejorar varios aspectos de la ciencia médica; por consiguiente, se busca implementar algoritmos en aras de optimizar los procesos de planificación, optimizar las compensaciones dosimétricas y entregar un plan de alta calidad. [11]



Se han realizado indagaciones fundamentadas en la planificación basada en el conocimiento, como por ejemplo “RapidPlan head and neck model: the objectives and possible clinical benefit”, presentado por el Departamento de Ciencias Biomédicas de la Universidad de Humanitas de Milán en el año 2017. El artículo indaga planes para evaluar un modelo de planeación basado en el conocimiento de Rapidplan (RP) generado para tratamientos de pacientes con cáncer avanzado de cabeza y cuello (HNC). Los planes que se utilizaron fueron los clasificados en la modalidad de tratamiento de VMAT. Los datos dosimétricos y geométricos que se usaron fueron los de 83 pacientes diagnosticados con cáncer de cabeza y cuello tratados entre el 2010 y 2014, definiendo 2 targets con niveles de dosis de 66,96 Gy y 54,45 Gy en 33 fracciones con boost integrado simultáneo (SIB), seguidamente fueron validados con 20 pacientes que no se usaron en el entrenamiento del modelo, para posteriormente comparar los planes generados por RP y los planes clínicos. El uso del RP mejoró la calidad del plan clínico, observándose una reducción de 2 Gy (2%), 5 Gy(12%)y 10 Gy(27%) de las dosis medias para parótida, cavidad oral y laringe, respectivamente, en los targets RP aumentó la homogeneidad en comparación con los planes clínicos, el objetivo con una prescripción del 54,45 Gy fue alcanzado por el RP, con una media del $54,4 \pm 0,3$ Gy, mientras que el valor medio del plan clínico fue de $55,1 \pm 0,6$ Gy, siendo un 1,3% de diferencia al valor de dosis esperado. La implementación de RP mejoró significativamente la calidad del plan de tratamiento clínico, ya que, se observó una disminución de la dosis en los OAR. [12]

Para comprobar la eficacia de la implementación de los diferentes softwares para la automatización en la planificación de los planes de tratamiento, se realizan investigaciones con las que se comparan los resultados de las actuales modalidades y las que se busca implementar en las instituciones. El siguiente artículo hace referencia a planes generados con RapidPlan y planes elaborados por un planificador con la modalidad de VMAT, “Dosimetric comparison of RapidPlan and manually optimized plans in volumetric modulated arc therapy for prostate cancer”, publicado por Kubo, K., Monzen, H., Ishii, K., Tamura, M., Kawamorita, R., Sumida, I., Nishimura, Y., en el año 2017, el propósito de este estudio fue evaluar si los planes basados en RapidPlan creados por una sola optimización se pueden usar en la terapia de arco volumétrico modulado (VMAT) para pacientes con cáncer de próstata. Con la implementación del modelo se concluye que hay reducción del tiempo de optimización independientemente de la habilidad y el conocimiento del planificador. [13] Mientras el estudio “Rolling out RapidPlan: What we’ve learnt”, publicado en la Journal of Medical Radiation Sciences por van Gysen K, O’Toole J, Le A, Wu K, Schuler T, Porter B, Kipritidis J, Atyeo J, Brown C, Eade T en el año 2020, durante las primeras etapas de la implementación de RP, uno de los desafíos a los que se enfrenta es saber cómo entrenar el modelo de forma óptima. Posteriormente se llevó a cabo un seguimiento a los planes que se realizaron con RP durante un periodo de 7 meses luego de la puesta en marcha del modelo en el departamento. La evaluación se realizó al revisar los planes creados con RP de acuerdo con el cumplimiento del protocolo de tratamiento, a continuación, se evaluó el rendimiento del modelo y se ejecutó una comparación de la eficiencia al planificar manualmente y con RP. Se consideró que un plan clínicamente aceptable era aquel que cumplía con los objetivos



de cobertura y las limitaciones de OAR. En los casos que no se logró simultáneamente una cobertura aceptable de todas las estructuras, el plan se podría aprobar con la respectiva decisión del radioncólogo, donde podría sacrificar cobertura del PTV a favor de las limitaciones en los OAR o si es necesario aceptar dosis más elevadas en los OAR. El rendimiento del modelo se evaluó de acuerdo con el número de optimizaciones necesarias para obtener un plan clínicamente aceptable, lo ideal sería en una única optimización. Los planes que no tuvieron éxito luego de tres optimizaciones con RP fueron definidos como una falla del modelo de RP y los planes se debieron completar manualmente. La eficiencia del RP y la planificación manual se determinó gracias al registro del tiempo total requerido para obtener un plan clínicamente aceptable, definido desde el inicio de la primera optimización hasta el final del tiempo de cálculo. [14] El artículo concluye, si bien la implementación de los planes optimizados con RP requiere inicialmente un tiempo prudente y recursos, posteriormente demuestra una calidad del plan clínicamente aceptable, al tiempo que se mejora significativamente la eficiencia del departamento de radioterapia, lo que sugiere que RP y su aplicación son una herramienta altamente efectiva en la práctica clínica. [14]

Mientras los avances en el campo de la planificación de radioterapia de MCO no se quedan atrás, la planeación con este tipo de modalidad permite a los planificadores y los médicos explorar y comprender las ventajas y desventajas en un determinado objetivo, proporcionando un medio para seleccionar el mejor plan para cada paciente gracias a la navegación en la superficie de Pareto. [15] Diversos autores han investigado respecto a la implementación de MCO para la planificación de tratamientos, dentro de los cuales se tienen: “Prediction of multi-criteria optimization (MCO) parameter efficiency in volumetric modulated arc therapy (VMAT) treatment planning using machine learning (ML)” presentado por el Departamento de Oncología Radioterápica de la Universidad Técnica de Múnich en enero de 2021, dentro de la investigación ultiman que al entrenar modelos de aprendizaje automático con una base de datos de planes de tratamiento los cuales han sido optimizados previamente, se observa que al implementar este tipo de procedimientos se pueden establecer los rangos de los parámetros de optimización. Las técnicas de aprendizaje automático (ML) se utilizan para determinar los contornos, la toxicidad y la predicción de resultados, como los gráficos de histogramas de dosis-volumen (DVH) y se han realizado estudios sobre predicciones basados en ML sobre distribuciones de dosis. Los datos de entrenamiento para el proceso de aprendizaje automático se tomaron de los resultados de optimización obtenidos de 44 geometrías craneales y 18 espinales de pacientes, para cada geometría se determinaron 343 distribuciones de dosis, obteniendo como resultado un total de 21 266 distribuciones. A pesar de la cantidad de resultados de optimización, la cantidad de 62 geometrías de pacientes no es suficiente para entrenar la predicción directa de valores dosimétricos basados en la elección de parámetros geométricos y de optimización, por lo tanto, se eligió un enfoque general que no predice directamente los valores si no que por el contrario sugiere un determinado estado en las posiciones de los controles deslizantes, una modificación en estos puede resultar en un efecto notable en un criterio específico. [16]

Los profesionales de Beatson investigan una combinación única y complementaria del software de planificación que se basa en el conocimiento de RapidPlan y MCO, con



RapidPlan se puede saber lo que se debe lograr para un paciente en función de los pacientes planificados y se obtienen las estimaciones de los histogramas dosis-volumen, mientras que MCO ayuda a adaptar el plan en función de las circunstancias clínicas únicas del paciente individual. MCO se puede ejecutar en segundo plano y brinda un grupo de planes optimizados para explorar las compensaciones a medida que se van variando los diferentes parámetros, y se crean planes de mayor calidad en menor tiempo. Para comprobar la eficiencia de la combinación de estos dos softwares se usan algunos parámetros como el índice de conformidad (IC) y el índice de homogeneidad (IH) de los planes de tratamiento. [17] [18]

La implementación de la planeación basada en el conocimiento en combinación con MCO es un tema relativamente nuevo, por consiguiente, hace poco tiempo se está incursionando en la implementación de este tipo de modelo y las investigaciones al respecto son algo limitadas. Sin embargo, una de las propuestas o artículo pionero es el de “Effectiveness of Multi-criteria Optimization-based Trade-Off exploration in combination with RapidPlan for head & neck radiotherapy planning”, presentado por parte de una de las integrantes del grupo VARIAN y a la vez líder científica clínica en Beatson West of Scotland Cancer Centre como lo es Suzanne Currie en colaboración con Eliane Miguel Chumacero, Garry Currie y Abigail Johnston, publicado el 23 de noviembre de 2018 [19], el artículo sustenta la estrategia que combina el uso de exploración de compensaciones basadas en la optimización de criterios múltiples y RapidPlan (PR) para la selección de parámetros de optimización que mejoran la compensación entre los órganos a riesgo y cobertura objetivo para la planificación de radioterapia de cabeza y cuello. Los planes optimizados al combinar los dos métodos mostraron una disminución en OAR mejorando significativamente y se perfeccionaban mientras mantenía la cobertura de dosis objetivo comparable con los planes clínicos. La disminución en OAR en comparación con los planes clínicos se logró para la dosis promedio de la parótida izquierda de 15.0 ± 4.6 Gy frente a 22.9 ± 5.5 Gy y para la parótida derecha 17.1 ± 5.0 Gy frente a 24.8 ± 5.8 Gy, sin embargo, se observó una ligera reducción en la dosis para el 99% del volumen del PTV nodal y un aumento para el 95% (al comparar los planes clínicos 76.0 ± 1.2 Gy vs 77.4 ± 0.6 Gy y 80.9 ± 0.9 Gy vs 79.7 ± 0.4 Gy), pero permanecieron dentro de la aceptación clínica. Los planes optimizados combinados mostraron un aumento en la complejidad, pero demostraron ser entregables, además revelaron una mejora máxima de la calidad del plan, al generarse una ligera pérdida en el PTV se obtuvo una mayor reducción en la dosis de OAR. Usaron una base de datos alimentada con los planes de tratamientos anteriormente administrados, estos debían cumplir con ciertas condiciones: conocer el origen del tumor y etapas de este mismo. Los planes clínicos fueron generados de acuerdo con la planilla de optimización interna y en los casos que se consideraban necesarios los planificadores expertos se encargaron de modificar los parámetros de optimización, donde los volúmenes objetivo fueron: el tumor principal (PTV1) y los ganglios del cuello incluidos en el volumen de tratamiento de planificación de bajo riesgo (PTVR). Para implementar MCO se requiere tener un plan de partida junto con la selección de los objetivos de optimización para la exploración de las compensaciones usados como base para generar planes alternativos. [19]



Indagando respecto a esta técnica para el tratamiento del cáncer de próstata se tiene la información presentada en un poster de Beatson West of Scotland Cancer Center, Radiotherapy Physics, NHS Greater Glasgow & Clyde, Reino Unido, publicado en Radiotherapy & Oncology (Journal of the European Society for Radiotherapy and Oncology) el 20-24 de abril de 2018 en Barcelona-España. Haciendo referencia a que RP ha demostrado anteriormente una mejora en la calidad del plan de próstata, dentro de los cuales se realizaron varios planes como sigue: 1. IMRT (plan optimizado con una solución de cinco campos), 2. RP_IMRT (plan optimizado con un modelo RP construido con planes IMRT), 3. RP_IMRT_MCO (el plan resultante de 2 es posteriormente optimizado con MCO), 4. RP_VMAT (plan VMAT optimizado con el mismo modelo RP de 2), 5. RP_VMAT_MCO (el plan resultante de 4, posteriormente optimizado con MCO). Los resultados manifestaron que todos los planes creados con las cinco técnicas diferentes lograron una cobertura de dosis objetivo aceptable, si se acepta que haya una reducción de dosis pequeña y clínicamente aceptable en los PTV, se tiene como resultado un índice de conformidad mejorado en el PTV1 y por consiguiente una reducción máxima en los OAR, para las técnicas que usan RP en combinación con MCO. [20]

De acuerdo a la información suministrada en las investigaciones por varios autores sobre la implementación y verificación del funcionamiento de RapidPlan y MCO en las diferentes instituciones, la mayoría de ellas concluyen que han aportado de una forma positiva a la mejora significativa en el flujo de trabajo de la planeación radioterápica, sin embargo, la mira se centra en buscar alternativas para optimizar las modalidades de planificación en aras de entregar planes con altos estándares de calidad y en un menor tiempo posible, por lo tanto; se ha planteado la implementación de RapidPlan en combinación con MCO, entregando resultados favorables para acogerlo y ponerlo en funcionamiento en las diversas instituciones donde se tiene la modalidad de tratamiento de radioterapia. [20]

Al realizar la respectiva búsqueda acerca del tema se han encontrado artículos sobre RapidPlan y MCO de forma independiente, sin embargo, información sobre la combinación de estos dos tipos de modalidades es escasa, considerando que es una propuesta algo reciente; pero que, ha presentado resultados positivos, impulsando a la implementación de este tipo de técnica. Por consiguiente, el adaptar este tipo de modelo en las instituciones que cuenten con un flujo de pacientes importante como el Hospital Universitario “Evaristo García E.S.E” resulta en una estrategia importante y prometedora. Asimismo dentro de los tipos de cáncer que mayoritariamente se tratan en el hospital es el de próstata, debido a este contexto se plantea implementar la modalidad de tratamiento de planeación basada en conocimiento en combinación con MCO en próstata, con el objetivo de optimizar el flujo de trabajo del departamento de radioterapia y entregar planes de tratamiento de mayor calidad, con una reducción de la dosis en los OAR y mayor focalización de la entrega de la dosis en los volúmenes objetivos. [18]

El flujo de trabajo del departamento de radioterapia está constituido por varios pasos que consumen tiempo y por ende afectan la calidad del tratamiento y el resultado en el paciente, respecto a las alternativas de solución la que resulta ser más prometedora es la



implementación de la inteligencia artificial (IA), considerada como una herramienta que contribuye en el aumento de la calidad, estandarizar y acelerar los procesos, por tanto, hace que la administración de la radioterapia sea más segura y precisa mediante la automatización y optimización de los flujos de trabajo, generando una ola de oportunidades y nuevos retos, confirmando que la supervivencia de los pacientes con cáncer se ha visto favorecida con su uso y cada vez la posibilidad de curación es mayor, no solo en el control local si no en la reducción de la toxicidad. [21]



4 MARCO TEÓRICO

4.1 MARCO CONCEPTUAL

4.1.1 Cáncer de próstata

El cáncer de próstata es uno de los tipos más comunes de cáncer en pacientes masculinos con una incidencia de 14 414 259 casos nuevos y 375 304 defunciones anuales a nivel mundial. Además, es considerado como el segundo cáncer más diagnosticado, basado en los datos registrados en el año 2020 [25]. Si este tipo de enfermedad se detecta en una etapa temprana, tiene mejores probabilidades de recibir un tratamiento exitoso. Las causas de esta patología no son claras. [28] El cáncer de próstata se puede propagar a cualquier parte del cuerpo, pero más comúnmente se disemina a los huesos y los ganglios linfáticos. Las tasas de mortalidad por el cáncer de próstata disminuyen gracias a la detección temprana de la patología, además de la mejora u optimización de las modalidades de tratamiento. Los registros de cáncer de próstata cumplen un papel importante en el avance de la investigación y la atención de esta enfermedad. [49_, [28]

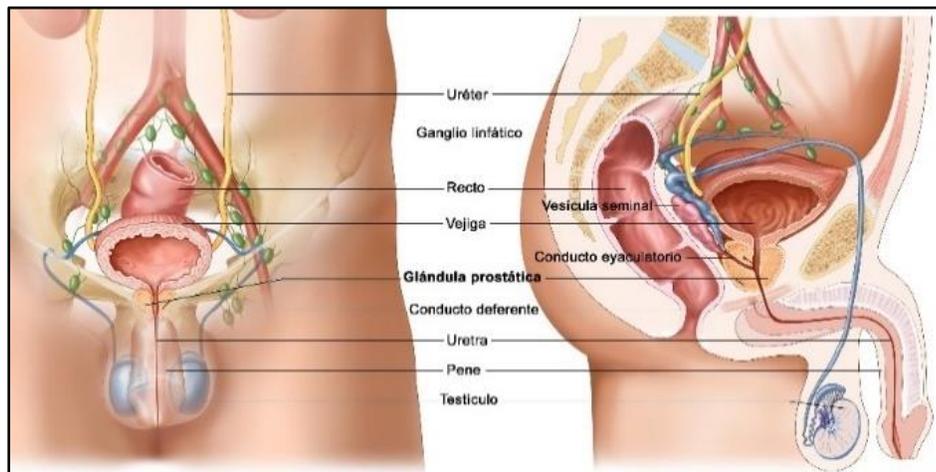


Figura 1.. Anatomía del aparato reproductor y urinario masculino. Tomado de Instituto Nacional del Cáncer [28]

El cáncer de próstata es una enfermedad donde se forman células malignas en los tejidos de la próstata con un crecimiento sin control, la verdadera causa del carcinoma prostático es desconocida, sin embargo, se sabe que el crecimiento está relacionado con la influencia de las células sexuales, el tumor por lo general suele crecer de forma lenta, por lo tanto; no presenta síntomas tempranos y se puede considerar como una enfermedad silenciosa. Los pacientes con cáncer de próstata son clasificados de acuerdo con los siguientes factores: estadio, prueba de PSA y resultado de la biopsia prostática. [48_ La prueba de PSA (antígeno prostático específico), consiste en la extracción de sangre para detectar los niveles de la proteína producida por las células de la glándula prostática. En la clasificación de CIE-10 el cáncer de próstata está representado por el siguiente código: C61X. [23]



4.1.2 Estadificación del cáncer de próstata

El sistema de estadificación más utilizado es el TNM elaborado por la American Joint Committee on Cancer (AJCC), haciendo una valoración del tumor tanto de forma loco-regional como a distancia. El sistema TNM se basa en las siguientes piezas clave de información:

1. Extensión del tumor principal (categoría T).
2. Propagación del cáncer a los ganglios linfáticos (nódulos) cercanos categoría (N)
3. Propagación del cáncer (ha hecho metástasis) a otras partes del cuerpo categoría (M).
4. El nivel del PSA (antígeno prostático específico) al momento de realizar el diagnóstico.
5. El grupo por grado (puntaje de Gleason), mide la probabilidad de que un cáncer crezca y se propague rápidamente.

1. **Tumor (T):** con referencia al TNM, la letra “T” se usa para describir el tamaño y la ubicación del tumor, así mismo algunos estadios pueden dividirse en grupos más pequeños que ayudan a la descripción del tumor con más detalle, a continuación, se incluye información sobre los estadios del cáncer de próstata, donde se describe la categoría tumoral de estadio clínico (cT) o estadio patológico (pT). [28]

1.1 Categoría T clínico:

Tabla 1 Categoría de estadificación T clínica del cáncer de próstata [28]

Categoría	Estado
TX	No se puede evaluar el tumor primario
T0	No hay evidencia de cáncer en la próstata
T1	Tumor clínicamente indetectable, no se logra apreciar en las pruebas de imagen ni se palpa con tacto rectal.
	T1a: el tumor se encuentra en el 5% o menos del tejido prostático extirpado en la cirugía.
	T1b: el tumor se encuentra en más del 5% del tejido prostático extirpado en la cirugía.
	T1c: tumor encontrado en la biopsia, por un nivel elevado del PSA.
T2	El tumor se encuentra únicamente en la próstata, es lo suficientemente grande para palparlo con tacto rectal.
	T2a: el tumor compromete la mitad de un lóbulo de la próstata.
	T2b: el tumor compromete más de la mitad de un lóbulo de la próstata, pero no ambos lóbulos.
	T2c: el tumor ha crecido a ambos lóbulos de la próstata.
T3	El tumor ha crecido a través de la próstata, en uno de los lóbulos y hacia el tejido de la parte externa de la próstata.



Categoría	Estado
	T3a: el tumor ha crecido a través de la próstata, afectando a uno de los lóbulos o a ambos.
	T3b: el tumor invade una o ambas vesículas seminales.
T4	El tumor está fijo y está creciendo hacia el interior de las estructuras adyacentes distintas a las vesículas seminales, como el esfínter externo, el recto, la vejiga, los músculos elevadores o la pared pélvica.

1.2 **Categoría patológica:** No hay una clasificación para TX, T0 o T1 para el estadio patológico de la próstata.

Tabla 2 Categoría de estadificación T patológica del cáncer de próstata [28]

Categoría	Estado
T2	El tumor se encuentra localizado solo en la próstata.
T3	El tumor ha crecido a través de la próstata, en uno o ambos lóbulos.
	T3a: el tumor ha invadido el cuello de la vejiga.
	T3b: el tumor ha crecido en la(s) vesícula(s) seminal(es).
T4	El tumor está fijo ha crecido hacia el interior de las estructuras adyacentes distintas a las vesículas seminales, como al recto, la vejiga y la pared pélvica.

2. **Categoría ganglionar (N):** Corresponde a los ganglios linfáticos, los cuales cumplen la función de combatir las infecciones, los ganglios que se encuentran cercanos a la próstata en el área pélvica son denominados ganglios linfáticos regionales, los ganglios linfáticos que se ubican en otras regiones del cuerpo son denominados ganglios linfáticos distantes. [28]

Tabla 3 Categoría de estadificación ganglionar (N) del cáncer de próstata [28]

Categoría	Estado
NX	No se pueden evaluar los ganglios linfáticos regionales.
N0	El cáncer no se ha diseminado a los ganglios linfáticos regionales.
N1	El cáncer se diseminó a uno o varios de los ganglios linfáticos pélvicos regionales.

3. **Categoría metastática (M):** indica que el cáncer de próstata se diseminó a otras partes del cuerpo, como a los pulmones y huesos (metástasis a distancia). [28]

Tabla 4 Categoría de estadificación metastática (M) del cáncer de próstata [28]

Categoría	Estado
MX	No se puede evaluar la metástasis a distancia.
M0	El cáncer no ha hecho metástasis.
M1	Hay metástasis a distancia.



Categoría	Estado
	M1a: el cáncer se diseminó a uno o varios de los ganglios linfáticos distantes.
	M1b: el cáncer se diseminó a los huesos.
	M1c: el cáncer se diseminó a otra parte del cuerpo, con o sin diseminación al hueso.

4. **Clasificación del cáncer de próstata por grados:** los patólogos para determinar el grado de los cánceres de próstata se basan en el sistema de Gleason, usando las muestras de tejido que se extraen en las biopsias, asignando un grado Gleason donde se usan números del 1 al 5, dentro de los cuales se considera la semejanza que exista entre las células cancerosas y las normales constituyentes del tejido prostático:
 - 4.1 Si las células del tumor canceroso se asemejan mucho a las del tejido normal, se les asigna el grado 1.
 - 4.2 Si las células tumorales y sus respectivos patrones de crecimiento lucen muy anormales, se asigna el grado 5.
 - 4.3 Los grados de 2 a 4 poseen características entre los dos extremos.

5. **Clasificación del cáncer de próstata por puntuación Gleason:** se debe considerar que el cáncer de próstata está constituido por áreas tumorales de diferentes grados, por lo tanto, se asigna un grado a las dos áreas más representativas, seguidamente los dos grados se suman y dan como resultado la puntuación de Gleason (suma de Gleason), la puntuación se puede encontrar entre 2 y 10:
 - 5.1 Para tumores con puntuaciones de Gleason de seis o menores, son denominados cánceres bien diferenciados (bajo grado).
 - 5.2 Los cánceres con puntuación de Gleason de 7 son llamados moderadamente diferenciados, las células tienen un aspecto algo similar a las células sanas (grado intermedio).
 - 5.3 Para los cánceres de puntuación de 8 a 10 son denominados como pobremente diferenciados, tienen un aspecto muy diferente a las células sanas (alto grado). [28]

Entre mayor sea la puntuación de Gleason mayor es la probabilidad de que el cáncer crezca y se propague rápidamente. La propagación de este tipo de cáncer inicia frecuentemente en las vesículas seminales, las metástasis linfáticas son identificadas con mayor frecuencia en las cadenas de ganglios intraabdominales. [48]

4.1.2.1 *Grupos de riesgo del cáncer de próstata*

Además de los estadios los médicos utilizan otros factores de pronóstico, provienen de la Red Nacional Integral sobre el Cáncer (NCCN), como se muestra en la siguiente Tabla 5. [24]



Tabla 5 Grupos de riesgo del cáncer de próstata [28]

Grupo de Riesgo	Clasificación del tumor	PSA (ng/ml)	Puntuación Gleason
Bajo	T1a, T1b, T1c o T2a	< 10	≤ 6
Intermedio	T2b o T2c	10 < PSA < 20	= 7
Alto	T3a	> 20	8 y 10

4.1.3 Definición de volúmenes

La especificación o determinación de los volúmenes en un tratamiento de un paciente es fundamental, debido a que brinda información sobre los tejidos, órganos y volúmenes, a continuación, se describen los tipos de volúmenes que se deben tener en consideración en la detección del cáncer de próstata:

- I. Volumen tumoral macroscópico (GTV):** se define como la región de extensión y localización demostrable del crecimiento maligno (tumor primario), generalmente corresponde a las zonas de crecimiento anormal donde la densidad de células malignas es superior, luego de una intervención quirúrgica no es posible delimitar el GTV.
- II. Volumen blanco clínico (CTV):** volumen de tejido que contiene al GTV demostrable o la enfermedad subclínica que debe ser eliminada, se determina de acuerdo con el estadio (bajo, intermedio o alto). Ayudando a establecer la inclusión de las vesículas seminales o los ganglios linfáticos.
- III. Volumen blanco de planificación (PTV):** para la definición de este tipo de volumen se debe hacer énfasis en los diferentes márgenes que lo componen:
Márgenes por variaciones geométricas e incertidumbres: para evitar desviaciones significativas respecto a la prescripción del CTV, se añaden márgenes que consideran las variaciones en su posición, tamaño y forma, conllevando a la definición del volumen blanco de planificación.
 - a) **Margen interno (IM):** se añade un margen al CTV para compensar los movimientos fisiológicos (respiración, diferente llenado de la vejiga o recto, entre otros), las variaciones de tamaño, forma y posición del CTV.
 - b) **Volumen blanco interno (ITV):** es la representación que abarca el CTV y el margen interno (IM), producido por los movimientos del órgano, pueden ser debidos a las modificaciones del volumen rectal o vesical.
 - c) **Margen de configuración (SM):** se tiene en consideración las incertidumbres (imprecisiones y pérdida de reproducibilidad) en el posicionamiento del paciente y la alineación de los haces terapéuticos durante la planificación y a lo largo de las sesiones de tratamiento.

Finalmente, el volumen blanco de planificación (PTV) es un concepto geométrico utilizado en la planificación de un tratamiento y es definido para seleccionar los



tamaños y las configuraciones adecuadas de los haces, con la finalidad de asegurar que la dosis prescrita sea realmente administrada al CTV.

- IV. Órganos de riesgo (OAR):** son tejidos normales cuya sensibilidad a la radiación puede influir significativamente en la planificación del tratamiento o en la dosis prescrita. Los órganos pueden estar organizados funcionalmente como en serie, paralelo o serie-paralelo. Para el cáncer de próstata los OAR que se deben considerar son: recto, vejiga, bulbo peneano y cabezas femorales (identificadas de forma independiente).
- V. Volumen de planificación del órgano de riesgo:** se deben considerar los movimientos del OAR durante el tratamiento, las incertidumbres en el posicionamiento y debe añadirse un margen al OAR para compensar dichas variaciones e incertidumbres, lleva al concepto de volumen de planificación para órgano de riesgo (PRV).

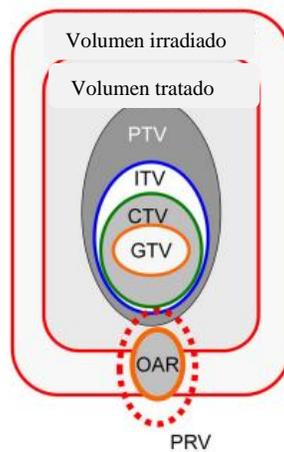


Figura 2.. Representación gráfica de la delimitación de volúmenes. Tomado de *Definition of target volumes and organs at risk* [22]

- VI. Volumen irradiado:** es el volumen del tejido que recibe una dosis significativa respecto a la tolerancia del tejido normal, la dosis debe expresarse en dosis absoluta o relativa respecto a la especificada para el PTV. [29],[30]

4.1.4 La planificación de un tratamiento

La planificación de un tratamiento tiene como objetivo la maximización de la dosis en el tejido tumoral y la minimización en los tejidos sanos, por lo tanto, además de la dosis total administrada tanto para el tejido sano como en el tumoral, nos interesa determinar la calidad de esa dosis, conllevando a la evaluación de la dosis mínima que se debe entregar a cada punto del tejido tumoral y la máxima dosis que no se debe superar en los órganos sanos. Para determinar los parámetros de calidad se construyen unos histogramas acumulados de porcentaje de tejido frente a la dosis que estos reciben, donde se busca maximizar el área que



se encuentra bajo la curva que corresponde al tejido tumoral y a la vez minimizar la de los tejidos a riesgo. [31]

4.1.5 Histograma dosis volumen (DVH)

Es un histograma que relaciona la dosis de radiación entregada al PTV en la planificación de la radioterapia, es una herramienta de evaluación para comparar dosis de diferentes planes o estructuras; resume las distribuciones de dosis en 3D en un formato gráfico 2D que representa el volumen o porcentaje de volumen de una estructura anatómica o de planeación que recibe una dosis igual o mayor a la mostrada en el histograma. Para realizar una evaluación de un tratamiento se han definido ciertos parámetros, estos permiten evaluar la dosificación del volumen de planeación. [32] [33]

Los DVH son una representación de un análisis estadístico de puntos de muestreo de dosis discreta con respecto al volumen. El eje horizontal representa la dosis (variable independiente) expresada en valor absoluto (Gy), mientras que el eje vertical es el volumen (variable dependiente) expresado en valor absoluto (cc o en valor relativo %).

4.1.6 Refuerzo secuencial y refuerzo integrado simultáneamente (SIB)

El objetivo de la planificación del tratamiento es lograr la cobertura de dosis requerida para el volumen de planificación (PTV), la cobertura adecuada de la dosis en el PTV significa que el 95% del PTV recibe la dosis prescrita. Los tipos de planes de tratamiento incluyen los 2D, 3D, VMAT, IMRT.

La dosis de prescripción para el tumor primario, los ganglios linfáticos y otros targets pueden diferir dependiendo del tratamiento clínico, generalmente a los ganglios linfáticos se suele prescribir una dosis más baja en comparación con el tumor primario. Para llevar a cabo este tipo de prescripción de dosis más elevada en el tumor primario se puede utilizar un método de refuerzo secuencial o de refuerzo integrado simultáneamente (Simultaneous Integrated Boost -SIB).

El método de **refuerzo secuencial** requiere de dos o más planes de tratamiento, según sea la cantidad de sesiones y targets; con este método se administra la misma dosis diaria tanto al tumor primario como a otros objetivos que están planificados para recibir una dosis total más baja, este método resulta ventajoso emplearlo cuando las dosis de prescripción para diferentes volúmenes tumorales difieren de forma significativa. Mientras que el método **SIB** requiere de un solo plan de tratamiento, entrega diferentes dosis diarias a los volúmenes blanco simultáneamente, este método puede producir distribuciones de dosis más conformes a diferencia del refuerzo secuencial. [8]



4.1.7 Algoritmos de cálculo

Los algoritmos de cálculo tienen una importancia relevante en los sistemas de planificación de tratamiento (TPS), se han establecidos algoritmos semi-analíticos para los cálculos de dosis en haces de fotones, por ejemplo: algoritmos de convolución de haz de lápiz, algoritmo analítico anisotrópico (AAA), algoritmo de cálculo de dosis Acuros XB, algoritmos de superposición/convolución, entre otros. [8] Además, los algoritmos de los sistemas de planificación deben ser capaces de predecir la dosis en cualquier punto dentro del paciente para luego determinar la aceptación o no de un tratamiento o la posterior elección de un plan alternativo de tratamiento.

El algoritmo analítico anisotrópico (AAA), es un algoritmo de superposición/convolución de haz de lápiz 3D, considera el cálculo de dosis de los fotones primarios, dispersión de fotones extra-focales y contaminación por electrones dispersados.

La fuente primaria puntual: está localizada en el plano del objetivo, el espectro de esta fuente se determina a través de los espectros de bremsstrahlung obtenidos en las simulaciones de Monte Carlo de la interacción de los electrones emitidos desde la fuente y el blanco, o que interactúan con el cabezal de la unidad de tratamiento. El endurecimiento del haz por el filtro aplanador se modela gracias a una función que disminuye la energía media mientras aumenta la distancia al eje central, la variación de la fluencia por debajo del filtro está definida por un perfil de intensidad que también depende de la distancia al eje del haz.

Fuente extra-focal: se trata de una fuente modelada con un ancho finito, situada en el plano inferior del filtro aplanador. Esta describe los fotones que son generados gracias a la interacción de estos con el cabezal del acelerador, principalmente con el filtro aplanador, colimadores primarios y las mandíbulas. La fuente secundaria se encuentra más cercana al isocentro, por tanto, permite describir el ensanchamiento del haz. La fluencia de la fuente en cuestión es calculada a través de la convolución de la fluencia primaria con una gaussiana con anchura proporcional a la de la propia fuente. El tamaño finito de la fuente secundaria y la energía media de los fotones emitidos por dicha fuente son fundamentales para después describir correctamente la penumbra de los perfiles de dosis.

Fuente por contaminación: este tipo de fuente modela los electrones creados fundamentalmente por interacción Compton en el cabezal de la unidad de tratamiento y el aire circundante entre el cabezal y el paciente. Fuente de tamaño finito localizada en el plano del blanco y se define con dos gaussianas que describen la dispersión lateral debido al tamaño finito de la fuente y la dispersión de los fotones en el agua.

El algoritmo AAA fue desarrollado para el cálculo de dosis en medios heterogéneos, este algoritmo considera anisótricamente las heterogeneidades del medio en tres dimensiones para el sitio de interacción, además utiliza convoluciones para calcular los fotones dispersos en las diferentes direcciones. El modelo de cálculo considera que el haz clínico se divide en pequeños haces (subcampos-beamlets) y estos coinciden con el tamaño



de la rejilla de cálculo, el maniquí de agua se representa como una distribución tridimensional de vóxeles con dimensiones pequeñas en las cuales se deposita la energía. La dosis correspondiente a los fotones primarios y secundarios se calcula teniendo en consideración los espectros característicos correspondientes. Mientras que la contribución de la dosis por fuentes de contaminación electrónica se considera con tamaño finito, situada en el plano del blanco, la fluencia viene dada por la convolución de la fluencia de la fuente primaria con una distribución gaussiana. [34], [35]

Acuros XB, este algoritmo modela la interacción física de la radiación con la materia, se considera como un solucionador de la ecuación de transporte lineal de Boltzmann basados en cuadrículas a través de métodos numéricos, el algoritmo se encarga de discretizar el espacio, ángulo de propagación y energía para resolver la ecuación en un rango particular de energía, espacio y ángulo. Para la discretización espacial, el volumen computacional se subdivide en elementos cartesianos de tamaños variables, donde se considera que las propiedades del material son constantes dentro de cada elemento computacional. [36], [37]

4.1.8 Planificación inversa

La IMRT y VMAT requieren de la delimitación de volúmenes de interés (PTV y OAR), adicionalmente se define la dosis total en el volumen tumoral, también se establecen las restricciones de dosis necesarias para proteger los tejidos aledaños al tumor (constraints), ángulos de colimador y gantry, luego de definir dichas indicaciones un algoritmo de cálculo con procesos de prueba y error genera un plan de irradiación con campos de tratamiento (formas de campo y pesos de estos mismos) que satisfacen los perfiles de dosis requeridos (perfiles de intensidad variable) lo más próximo posible a los criterios definidos al inicio de plan de tratamiento respecto a la distribución de dosis en el tumor y a los órganos circundantes, dicho procedimiento se denomina planificación inversa. Para ello se emplean métodos de optimización, a partir de una función de dosis absorbida (función objetivo) se busca minimizar o maximizar dicha función mediante un algoritmo de optimización el cual entregue un conjunto de mapas de fluencia. En la radioterapia convencional los campos aplicados tendrán el mismo tono de gris en todos los puntos (misma fluencia). Un haz de intensidad modulada se describe a través de un perfil de dosis que varía de forma que se maximice la dosis al blanco y se disminuya esta misma en los OAR's, cada haz tiene una fluencia variable (diferentes tonos de gris), como se puede observar en la Figura 3. [35], [38]

Se podría considerar que en un plan ideal la isodosis prescrita se debe ajustar al volumen objetivo planificado (PTV) mientras se administra una dosis mínima a los órganos a riesgo. Para obtener un plan óptimo, la planificación inversa se constituye por los siguientes componentes clave:

- Objetivos de planificación.
- Función de costo que mide la calidad del plan.



- Optimizador para minimizar la función de costo.

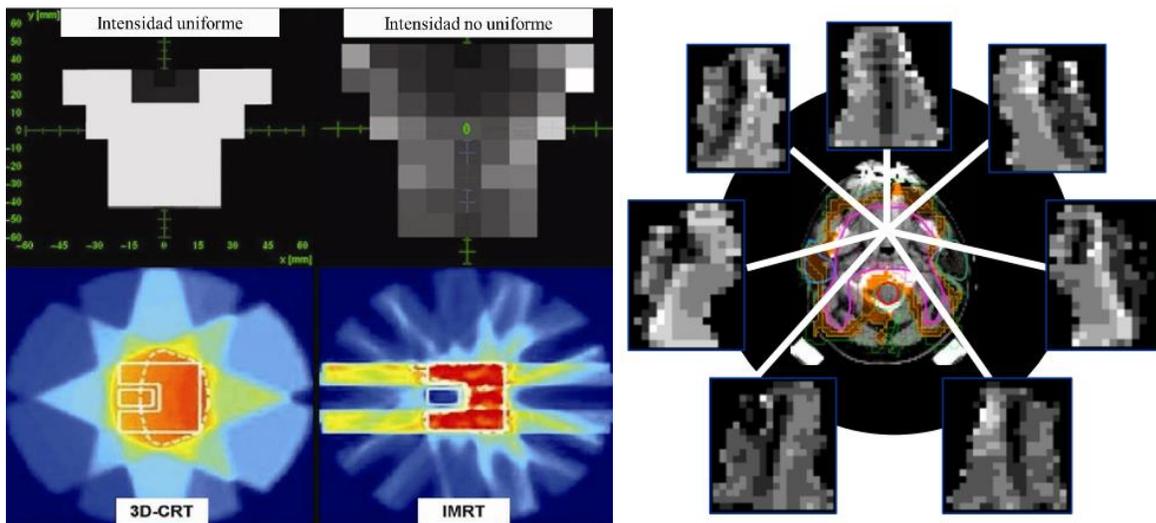


Figura 3.. Representación gráfica de la fluencia para técnicas de tratamiento 3D-CRT e IMRT, Tomado de Desarrollo de un sistema de verificación de tratamientos en radioterapia con modulación de intensidad [39] [35]

Para los planificadores es muy importante establecer los objetivos de planificación, por lo tanto, la función de costo se puede definir de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: n representa el número de objetivos de planificación, $w_i > 0$ es el factor de peso y $f_i(x)$ es la función de costo objetivo individual. El factor de peso brinda a los usuarios la capacidad de definir la importancia de ciertos objetivos de planificación.

Para órganos en distribución paralela se necesitan funciones de costo basadas en dosis-volumen, usando un algoritmo de búsqueda de gradiente (acepta cambios que resultan en la disminución de la función de costo) la función de costo puede tener múltiples mínimos y, por lo tanto, la solución final puede no tener el costo más bajo (mejor solución). Una función de costo que puede tener múltiples mínimos se conoce como un problema no convexo, el costo no convexo puede quedar atrapado en un mínimo local, por lo tanto, el optimizador puede pensar que no puede reducir más la función de costo, pero hay una mejor solución disponible (mínimo global), como se puede observar en la Figura 4. El optimizador se centra en las funciones con el valor objetivo más alto durante el proceso de optimización. [8]

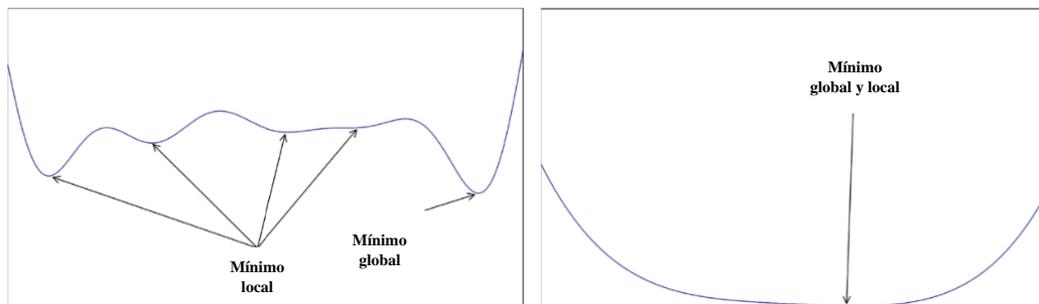


Figura 4.. Representación de una función no convexa. Tomado de *Strategies for Radiation Therapy Treatment Planning* [8]

A continuación, se tiene la definición de las diferentes funciones objetivo con su respectiva clasificación y aplicación:

Tabla 6 Funciones objetivo y sus respectivas aplicaciones

Función objetivo	Tipo de función	Definición	Aplicación
Dosis mínima/máxima	Convexa	Dosis máxima ó mínima en cualquier punto	Para PTV y OAR en serie
DVH mínimo	No convexa	Dosis a % volumen > dosis definida	Para PTV
DVH máximo	No convexa	Dosis a % volumen < dosis definida	Para OAR en paralelo y PTV.
Dosis uniforme	No convexa	La dosis en todo el volumen es uniforme	Para PTV

4.1.9 Inteligencia artificial (IA):

Se encuentra formada por una serie de algoritmos lo suficientemente entrenados que otorgan la capacidad de predicción de resultados (toma de decisiones) por parte de una máquina o un programa informático. Es una forma de simular los procesos de la inteligencia humana, entre los cuales se encuentra el aprendizaje, el razonamiento y la autocorrección, mediante diversos algoritmos que aprenden y toman decisiones [40]. Recientemente se ha implementado la inteligencia artificial para automatizar los planes de tratamiento, la optimización de las compensaciones dosimétricas contribuye en la entrega de planes de alta calidad. Dentro de la informática la IA puede ser definida como el estudio de algoritmos y dispositivos, estos perciben información del entorno y toman medidas para que se logre maximizar la posibilidad de lograr determinados objetivos. En el campo de la oncología radioterápica la IA juega un papel importante, entre los que se destaca la segmentación de objetivos y tejidos, la planificación del tratamiento, la administración de radioterapia, y la evaluación de la respuesta al tratamiento. Un planificador humano es el encargado de tomar decisiones correspondientes a los parámetros básicos de planificación, la energía del haz, los



ángulos, entre otros, generar un plan aceptable; en algunos casos puede generarse de forma rápida, pero mejorar un plan puede ser una labor menos sencilla y conlleva a que haya muchas iteraciones entre los planificadores del sistema de planificación del tratamiento. Por lo tanto, estas actividades iterativas de las interacciones conducen a esfuerzos humanos grandes y una dedicación de tiempo importante. [40]

4.1.10 El aprendizaje automático

Es una rama de la inteligencia artificial, que aprende al realizar el respectivo análisis de datos y posteriormente genera su propia decisión por medio de algoritmos (reconocimiento de patrones, aprender de errores y predecir resultados). Para el aprendizaje automático las computadoras aprenden con ejemplos y entre más datos se administren presentan mejores resultados, sin embargo, es pertinente considerar que el uso de métodos algorítmicos en la rama de la medicina están direccionados al mejoramiento de la calidad de los sistemas de salud, además, se debe realizar un respectivo proceso de validación para implementar este tipo de recursos tecnológicos en diversos procesos médicos. [41]

4.1.11 Herramientas de optimización avanzadas

Los sistemas de planificación de optimización actuales están implementando herramientas de planificación avanzadas, entre las cuales se tiene: planificación automática (se basa en el sistema de planificación de tratamientos Pinnacle de Philips), optimización multicriterio (MCO, se basa en el sistema de planificación de RayStation) y planificación basada en el conocimiento (se basa en el sistema de planificación de tratamiento Eclipse de Varian Medical Systems). [8]

4.1.12 Planificación basada en el conocimiento

Se define como una herramienta que utiliza el conocimiento y la experiencia de planes de tratamiento de pacientes previos para predecir una dosis que sea alcanzable en un nuevo paciente de una población con características similares o para obtener un mejor punto de partida en una determinada optimización de prueba y error por parte del planificador, diseñado para mejorar la velocidad, la eficiencia y reducir la variabilidad en la planificación de tratamientos. Hay dos tipos de enfoques distintos, uno se basa en atlas y el otro en modelos.

El método basado en atlas se fundamenta en el uso de la base de conocimiento para seleccionar el paciente con las coincidencias similares para generar un punto de partida para la optimización inversa, el cual se establece en plantillas convencionales.



El histograma dosis-volumen es uno de los métodos de la planificación basada en el conocimiento usando modelos, por lo tanto, utiliza una gran cantidad de planes y contornos de tratamiento clínicamente aceptados con los cuales caracteriza las relaciones entre las características anatómicas y geométricas para una determinada región anatómica para luego construir un modelo predictivo de DVH para dicha región. Para cada paciente nuevo tratado en la misma región este conocimiento se usa para predecir el DVH alcanzable en función de los contornos similares y la calidad del plan de tratamiento. [42]

En la Figura 5 se puede observar un ejemplo de la predicción de DVH usando KBP para un caso de cáncer de próstata, donde se observa que se encuentran definidos tres targets (volúmenes objetivos), las líneas sombreadas representan el rango previsto del DVH alcanzables para los diferentes OAR, las líneas sólidas son el DVH real logrado en el plan. [8]

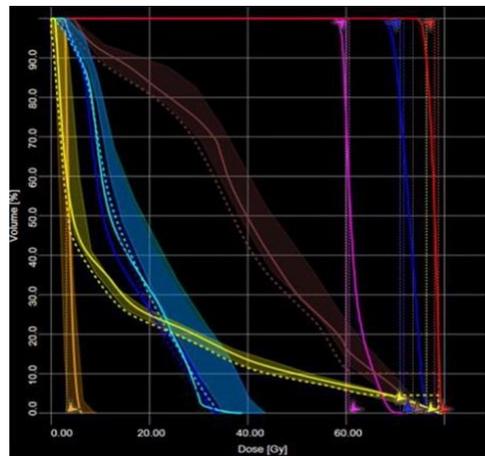


Figura 5.. Ejemplo DVH de ca de próstata usando RapidPlan, donde los colores representan: rosado, azul y verde (volúmenes objetivo), amarillo (vejiga), café (recto), naranja (intestino delgado) y cian (cabezas femorales). Tomado de *Automation in intensity modulated radiotherapy treatment planning—a review of recent innovations* [42].

4.1.13 RapidPlan

Funciona con el uso de bases de datos constituidas con los diferentes planes de tratamiento administrados, estos tienen información respecto a las distribuciones de dosis y la geometría de los órganos a riesgo OAR y PTV de pacientes que fueron tratados con anterioridad, con el objetivo de crear rangos que ayuden a predecir los histogramas de dosis-volumen (DVH) para los OAR individuales, la información obtenida se usa para los pacientes nuevos, para formar los histogramas DVH, RapidPlan requiere que cada uno de los OAR se encuentren presentes en al menos 20 planes, con los cuales se forma la estimación del plan modelo, esta evaluación se obtiene a partir de un modelo entrenado con planes clínicamente válidos. [43],[44]

Con la implementación de RapidPlan se obtienen rangos de DVH estimados y objetivos de optimización generados, en la planificación del tratamiento se tiene la entrada (geometría del haz, objetivo y OAR's), posteriormente el planificador lleva un determinado proceso para



dar como resultado un plan de tratamiento nuevo (la salida), por tanto, un algoritmo informático puede predecir la salida de una nueva geometría de entrada (paciente) en función de lo que ha aprendido del conjunto de datos de entrenamiento (estima una salida desconocida basada en parámetros de entrada conocidos). RapidPlan se entrena en función de los planes existentes de los cuales extrae: geometría del paciente (conjunto de estructuras), geometría del plan (disposición de los campos) y la distribución de la dosis.

El entrenamiento del modelo se puede dividir en dos fases: extracción y formación. En la fase de extracción se parametriza tanto la dosimetría como la geometría de cada uno de los planes de la biblioteca. Para la evaluación de la geometría los OAR se dividen en: región fuera de campo (dosis dispersa), región de transmisión laminar (no es muy afectada por la optimización), región de superposición de los OAR con el objetivo (dosis comparable con la del objetivo) y la región en el campo (región con mayor modulación), como se puede observar en la Figura 6. Considerando que las tres primeras regiones poseen modulaciones limitadas, el DVH promedio es calculado junto con la desviación estándar, dicha desviación en estos casos representa los límites inferior y superior para la predicción del DVH (para cada partición del OAR por separado). Mientras que la región en el campo necesita de mayor modulación, por tanto, requiere una descripción más sofisticada, la geometría es evaluada con el uso de GED (dosis esperada basada en la geometría), se usa para determinar cómo la posición geométrica y la distribución de dosis en un OAR, en relación con los objetivos afectan la dosimetría alcanzable (predicción) bajo la geometría de campo actual (geometrías de campo), GED también tiene en consideración las características físicas y el comportamiento de los fotones. [45], [46], [47]

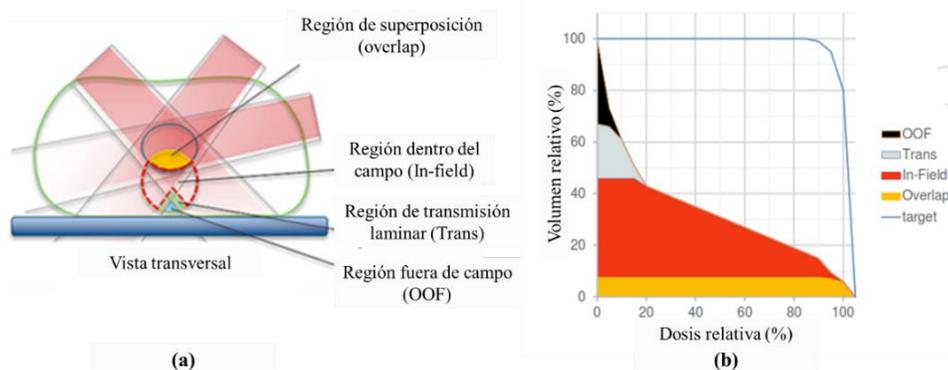


Figura 6.. Representación de la segmentación de los OAR's, (a) definición de cada una de las regiones de partición, (b) representación de cada segmento del OAR en el DVH respectivo, Tomado de *Evaluation of an Automated Proton Planning Solution, RP201 RapidPlan 16.1 Implementation*, [45], [47]

La geometría de un OAR se define a través del DVH de GED, volumen del OAR y superposición entre el OAR y el PTV, posteriormente RapidPlan parametriza la geometría de los OAR y los DVH logrados mediante el análisis de componentes principales, luego hace uso de un modelo de regresión para predecir un rango probable de DVH para cada OAR de un posible paciente al proporcionar la geometría de este mismo, como se puede evidenciar en la Figura 7. Los objetivos de dosis volumen se colocan de forma automática cerca del



límite inferior de cada uno de los rangos de predicción del DVH de OAR, con la finalidad de guiar el proceso de optimización. [45], [46]

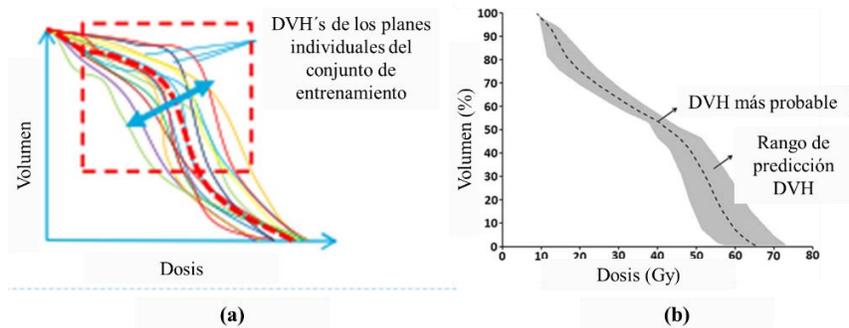


Figura 7.. DVH estimados para OAR, (a) conjunto de DVH's de los planes individuales, (b) representación del rango de predicción y DVH más probable. Tomado de RP201 RapidPlan 16.1 Implementation, Can knowledge-based DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans?, [46], [47]

En la etapa de formación, inicialmente se debe definir el alcance del modelo, se establece la región de tratamiento y las estructuras presentes (OAR y PTV) y adicionalmente se agregan los objetivos clínicos, este proceso se puede realizar de forma manual (establecidos por el usuario) o generados automáticamente por el modelo, los límites superior e inferior de los PTV dependen exclusivamente de la media y la desviación estándar de los DVH de los objetivos de los planes de entrenamiento (no se usa aprendizaje automático como ocurre con los OAR's), los límites pueden ser modificados según la prescripción de dosis de entrada. Seguidamente se procede a agregar los planes al modelo de estimación de DVH (es recomendable utilizar planes con alta calidad, ya que, el modelo se basa en los valores medios en la mayoría de los planes de entrenamiento, no en el mejor plan), se continua con el entrenamiento del modelo, en la Figura 8 se observa las fases constituyentes a la creación de un modelo de planeación usando RapidPlan, la coherencia del modelo se evalúa en el entrenamiento de este mismo (verificación), además cualquier modelo requiere de la validación del usuario. [45],[47]

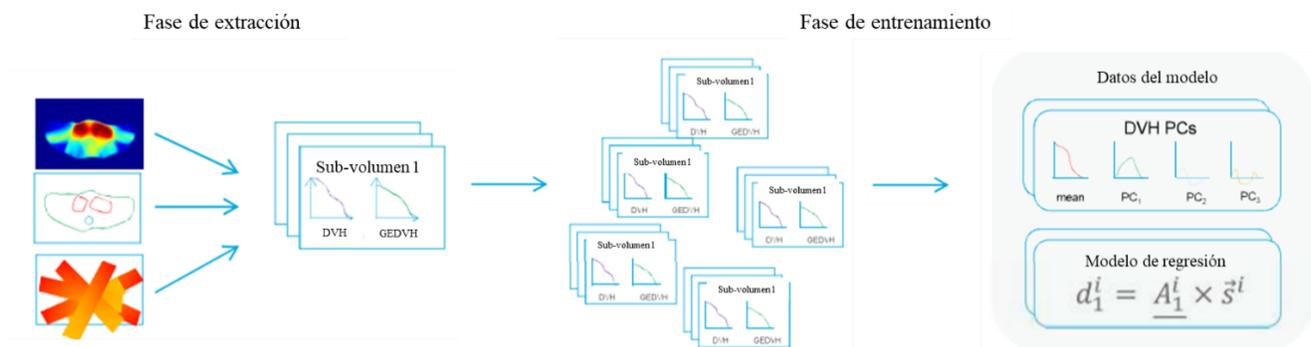


Figura 8.. Fases del entrenamiento de un modelo de planeación con RapidPlan. Tomado de RP201 RapidPlan 16.1 Implementation, [47]

La calidad de los modelos se puede evaluar utilizando los gráficos de regresión, residuales y DVH, valores de R2, estos indican la calidad y la varianza de los modelos de



regresión, donde 1 representa un ajuste perfecto entre las características geométricas y dosimétricas. [45], [47]

4.1.14 Optimización Multicriterio (MCO)

Busca optimizar un vector compuesto por una o varias funciones objetivo en representación de cada estructura anatómica, por lo tanto, se generan varias soluciones, las cuales describen una construcción matemática y se obtiene una aproximación a la superficie de Pareto, compuesta por diferentes planes, cada uno de estos priorizando un determinado objetivo de optimización con relación a los demás; es decir, un plan alternativo se considera óptimo si un objetivo se mejora mientras hay deterioro de otros y posteriormente se procede a seleccionar el mejor plan que cumpla con los objetivos prescritos (establecidos). [48],[49]

MCO se centra en el concepto de solución óptima de Pareto, está constituido por dos enfoques, aproximación a posteriori y a priori. Con la aproximación a posteriori en vez de generar un solo plan se generan automáticamente múltiples planes, cada uno de estos planes representa una solución óptima de Pareto.

En la Figura 9 se puede observar el gráfico de dos criterios, en la gráfica se muestra una gran cantidad de diferentes soluciones de planificación factibles, las cuales representan permutaciones de los criterios 1 y 2. La línea sólida representa el frente de Pareto, al mejorar un criterio inevitablemente conduce al empeoramiento del otro y viceversa. Los planes que se encuentran en el frente son las soluciones óptimas de Pareto (representadas como círculos azules en la Figura 9). El mejor plan clínicamente aceptable es el Pareto óptimo, en el método a posteriori acercarse a la base de datos de planes óptimos de Pareto se realiza al navegar por el planificador del tratamiento para elegir un plan óptimo. La automatización de este proceso se basa en la generación automática de la base de datos de planes óptimos, matemáticamente hay una cantidad infinita de planes óptimos. [42]

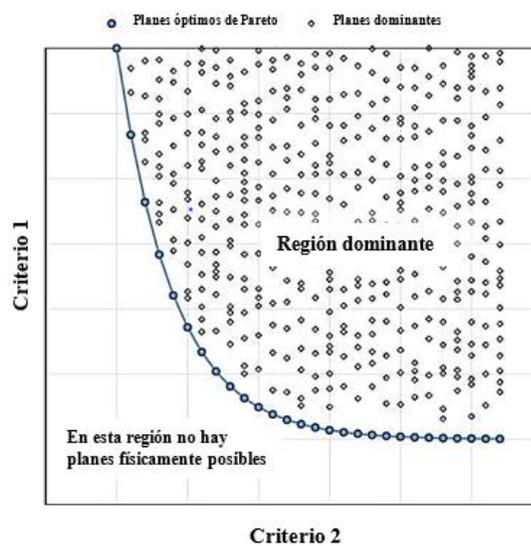


Figura 9.. Representación de soluciones óptimas de Pareto. Tomado de Automation in intensity modulated radiotherapy treatment planning—a review of recent innovations [42].



En el método a posteriori la dimensionalidad de los frentes de Pareto está definida por la cantidad de objetivos clínicos y del número de planes necesarios para construir los frentes, para describir la dimensionalidad se considera que $2 * N + 1$ planes son suficientes, donde N es el número de objetivos.

En el enfoque a priori de MCO solo se genera automáticamente un único plan Pareto óptimo, la optimización se encuentra basada en un protocolo específico de la región de tratamiento, cuenta con una lista que contiene las funciones objetivas con prioridades asignadas y restricciones que no deben violarse. [42]

Para la implementación de MCO se necesita un plan de tratamiento como punto de partida, este es definido como el centro de aproximación para la creación de la superficie de Pareto, [50] la cual está formada por un espectro de planes óptimos, cada punto dentro de la superficie representa una solución óptima con diferentes objetivos de compensación, por lo tanto, un determinado usuario puede acceder a las diferentes combinaciones (soluciones) en tiempo real sin la necesidad de volver a optimizar o recalcular la dosis, estas están definidas en función de los objetivos específicos, buscando una optimización de los parámetros dosimétricos, además se puede obtener conocimiento respecto a las restricciones necesarias de la planificación [51],[52]. Un plan de MCO se puede elegir al navegar sobre la superficie de Pareto haciendo uso de los controles deslizantes del programa permitiendo explorar los posibles compromisos entre las dosis de los OAR y cómo puede afectar la cobertura objetivo, también tiene la opción de dejar fijo uno de estos controles y se continúa navegando con los demás, posterior a la navegación sobre la superficie de Pareto se obtiene el plan óptimo, el cual entrega los parámetros de cada punto de control, información que se utiliza para el posterior cálculo de la dosis final. [51]

MCO como tal crea una base de datos de planes que satisfacen diferentes objetivos en la planificación de un determinado tratamiento generando una superficie de Pareto con lo cual si se realiza un cambio en la dosis que va recibir un órgano se genera una compensación en otro órgano, por lo tanto, este sistema permite observar las compensaciones en los objetivos de planificación y de esta manera elegir el mejor plan que se ajuste a los parámetros establecidos inicialmente en el plan de tratamiento. [52] MCO busca tratar las estructuras objetivo en las cuales se depositan dosis altas y homogéneas en los volúmenes tumorales, mientras que para los órganos a riesgo se entreguen dosis bajas. [52]

4.1.15 Prescripción de dosis de tratamiento

Actividad llevada a cabo por parte de los radioncólogos, mediante la cual determinan la dosis a administrar al volumen blanco y el fraccionamiento que se requiere para administrar dicha dosis, teniendo en cuenta los OAR, esta etapa se compone por tres procesos importantes: prescripción de la dosis al volumen blanco, prescripción de la dosis en OAR y selección del fraccionamiento más adecuado. En la prescripción de la dosis se debe



considerar el tamaño del tumor, localización y extensión tumoral, estado general del paciente, técnica de tratamiento y establecer la intención del tratamiento (paliativo o curativo). [30]

- I. Prescripción de dosis al volumen blanco:** Consiste en prescribir la dosis al PTV, buscando el mayor cubrimiento de este volumen con dicha dosis, pero es importante tener conocimiento de que no se puede entregar el 100% de está dosis, además la dosis máxima y la mínima no van a ser iguales a las dosis prescritas, por lo tanto, se trata de buscar una uniformidad dentro del PTV entre un -5% y un +7% de la dosis prescrita. Debe cumplir con el $D_{95} \geq 100\%$ [cGy], es decir que el 95% del volumen del PTV reciba el 100% de la dosis de prescripción, con una variación aceptable de $D_{95} \geq 95\%$. Para la dosis máxima en el PTV se tiene $D_{max} \leq 107\%$ [cGy], es decir que la dosis máxima dentro del volumen del PTV reciba el 107% de dosis prescrita con una variación aceptable hasta el 110%. [30]
- II. Prescripción de dosis en OAR:** Muchos autores han estudiado la tolerancia de los tejidos sanos a la radioterapia, antes de realizar como tal prescripción de la dosis hay que tener en cuenta si los órganos pertenecen a la clasificación de paralelo o en serie, para los órganos en serie hay que especificar la dosis máxima que puede tolerar el mismo, la cual no se debe sobrepasar durante el tratamiento, para los órganos en paralelo se refiere al volumen de órganos que no pueden sobrepasar una determinada dosis de tolerancia. [30]
- III. Fraccionamientos:** Proceso por el que se selecciona el fraccionamiento más adecuado para un paciente para alcanzar los objetivos del tratamiento.

Desde hace varios años se ha venido implementando el hipofraccionamiento para el tratamiento del cáncer, el cual consiste en disminuir el tiempo total de administración del tratamiento de radioterapia, actualmente existe evidencia importante que permite disminuir el número de fracciones en radioterapia para cáncer de próstata, debido al uso de la radioterapia guiada por imagen (IGRT), permitiendo entregar un tratamiento con mayor precisión. [30] A continuación, se presentan dos fraccionamientos implementados para el tratamiento del cáncer de próstata y las respectivas prescripciones de dosis en OAR.

4.1.15.1 Tratamiento de cáncer de próstata hipofraccionado

En las siguientes tablas se muestran los protocolos para tratamiento de cáncer de próstata: RTOG 0415, CHHiP y PROFIT.

Tabla 7.. Hipofraccionamiento (RTOG 0415)

PTV (target)	Dosis total (Gy)	Número de fracciones	Tiempo de tratamiento (días)
Próstata	70	28	38
Vesículas	61.6		
Ganglios pélvicos	50.4		



Tabla 8.. Hipofraccionamiento (CHHiP y PROFIT)

PTV (target)	Dosis total (Gy)	Número de fracciones	Tiempo de tratamiento (días)
Próstata	60	20	28
Vesículas	54		
Ganglios pélvicos	44		

4.2 MARCO CONTEXTUAL

El Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E” es un centro médico de mediana y alta complejidad el cual se encuentra ubicado en la capital del departamento del Valle del Cauca. En el año 1 956 abrió sus puertas para ofrecer consultas a la comunidad del suroccidente colombiano, contaba con un servicio único de urgencias en la región; en la década de los 90 se desarrollaron 63 proyectos de modernización tecnológica y física con apoyo del Ministerio de Salud, el departamento del Cauca y la Secretaría de Salud. Mediante el decreto No. 1807 del 07 de noviembre de 1 995 el Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E” se transforma en una Empresa Social del Estado.

El Hospital está direccionado al desarrollo del doble carácter tanto de docencia como asistencial, encaminando proyectos entorno a principios de la calidad y eficiencia, además de capacitar a su personal en talento humano en las áreas administrativas, técnicas y de desarrollo humano, para formar el personal con los requisitos académicos y técnicos con características humanas y éticas que permiten alcanzar altos niveles de compromiso con el cumplimiento de la misión del HUV. [53]

Dentro de los servicios que ofrece el Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E” se encuentran: ginecología, pediatría, neurología, ortopedia, banco de sangre, imágenes diagnósticas, unidad de investigación e innovación, unidad de terapia intensiva, CRYC, hematología y oncología, cirugía, unidad de quemados, consulta externa, hospitalización y urgencias. En el servicio de hematología y oncología se brinda atención integrada para pacientes adultos y pediátricos, esta unidad cuenta con infraestructura para servicios tales como: onco-hematología pediátrica, hemato-oncología adultos, enfermería oncológica y grupo PICC, atención psicosocial, sala de procedimientos, sala ludo educativa y radioterapia [54].

El Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E” se caracteriza por entregar servicios con altos estándares de calidad gracias a la adquisición de tecnología de punta y personal calificado, dentro de la capacidad instalada en el servicio de radioterapia se tiene: un acelerador CLINAC IX®, un acelerador Lineal TrueBeam® y Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis (BRAVOS®), tecnología para la detección de superficie e identificación de paciente (Identify). Además, del equipamiento con software como: RapidPlan, optimización multicriterio (MCO), HyperArc y Velocity. En el área se cuenta con la participación interdisciplinar de: oncólogos radioterapeutas, físicos médicos, enfermeros oncólogos, tecnólogos en radioterapia y auxiliares de enfermería. [55]



De acuerdo con el flujo de trabajo en el servicio de radioterapia se tiene la atención a pacientes con diferentes patologías, que puede ser evidenciado en concordancia con el número de inicios de tratamiento para las diferentes regiones anatómicas con una media de 883 pacientes anuales con IC de 95%: (739 – 1 028), dentro del periodo de 2018 hasta 2022, entre las afecciones más frecuentes tratadas en el servicio se encuentra el cáncer de seno, próstata, cabeza y cuello. El cáncer de próstata es bastante recurrente y se pone en manifiesto con una media de 123 pacientes por año con IC de 95%: (87 – 159) tratados durante los últimos cinco años, desde 2018 hasta 2022 (datos suministrados por el software de ARIA-ECLIPSE del HUV) representando el 14% del total de inicios de tratamiento.

Considerando que el Hospital busca entregar tratamientos con los más altos estándares de calidad, se tiene el planteamiento de la implementación de un modelo de planificación basado en el conocimiento en combinación con la optimización multicriterio, con la finalidad de elaborar planes mayormente optimizados; sin embargo, es importante hacer una evaluación de las técnicas de tratamiento ordinarias y las del modelo, para determinar los diferentes parámetros de evaluación de calidad de un plan de tratamiento, para posteriormente comparar las dos técnicas. Se espera que el modelo brinde resultados satisfactorios y se logre una importante reducción de toxicidad en los OAR, mejor cubrimiento del PTV y disminución en el tiempo de planificación con el objetivo de fortalecer los estándares de calidad ofrecidos por el servicio de radioterapia.

La optimización e implementación de los planes de tratamiento para el cáncer de próstata en el departamento de radioterapia del Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E”, se llevará a cabo gracias a la ejecución del modelo de planificación basado en conocimiento combinado con MCO. La puesta en marcha del modelo conlleva un proceso el cual quiere un determinado tiempo para realizar las actividades necesarias, principalmente se deben validar los planes de tratamiento pasados, que serán sometidos a una optimización con la modalidad de MCO, con que se obtendrá un plan mayormente optimizado, con el que se puede interactuar en tiempo real gracias a los controles deslizantes en busca del plan óptimo. A continuación, los planes optimizados con MCO son usados para alimentar la base de datos de RapidPlan, posteriormente se debe ejecutar el algoritmo para obtener un plan óptimo.

Los parámetros que se calcularon en el plan y el histograma dosis-volumen serán usados para evaluar los índices de calidad de los planes: índice de conformidad, índice de homogeneidad. Además, una variable bastante importante que se debe resaltar es el tiempo que tarda el proceso de planificación con la implementación de estos dos programas en conjunto. Para determinar la eficiencia del modelo de planeación se van a elaborar nuevamente los planes de tratamiento seleccionados de la muestra realizados de forma manual con la ayuda del modelo entrenado, seguidamente de estas dos modalidades de planeación se obtienen los parámetros finales de cada uno de los planes y la información necesaria para evaluar el funcionamiento del modelo de planificación y determinar si cumple con los objetivos que se han planteado, los cuales se basan en entregar planes con altos estándares de calidad (disminución de la dosis en los órganos a riesgo y focalizar la mayor dosis posible en el volumen blanco) y la disminución del tiempo de planificación en aras de



optimizar el flujo de trabajo del departamento de radioterapia de la institución, debido a que hay un gran número de pacientes que padecen cáncer de próstata, esta implementación permitiría recibir más pacientes y disminuir los efectos secundarios del tratamiento. [18]

4.3 MARCO NORMATIVO

En Colombia mediante el Ministerio de Salud y Protección Social se implementó la Resolución Número 1328 de 2021, por medio de la cual se adopta estándares de acreditación para instituciones prestadoras de servicio de salud, Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad en Salud (SOGCS), el cual se trata de un conjunto de instituciones, normas, requisitos y procesos deliberados y sistemáticos del sector salud para generar, mantener y mejorar la calidad de los servicios de salud del país. El SOGCS está integrado por cuatro ramas importantes: Sistema Único de Habilitación (SUH), Programa de Auditoría para el Mejoramiento del Sistema de Calidad (PAMEC), Sistema Único de Acreditación (SUA) y Sistema de Información para la calidad en salud. [56]

La auditoría para el mejoramiento de la calidad de la atención en la salud se realiza a través de un mecanismo sistemático y continuo de evaluación de la calidad observada respecto a la calidad esperada (criterios y estándares de calidad establecidos para medir el desempeño de los procesos) de la atención en salud que reciben los usuarios, impulsando el continuo desarrollo de procesos de mejoramiento, con la implementación de la constante evaluación de los estándares de calidad, la acogida y puesta en marcha de las observaciones realizadas en los resultados de las auditorías. [56]

Mejoramiento continuo de la calidad (MCC): la auditoría para el mejoramiento de la calidad es fundamental debido a que representa un mejoramiento continuo en el Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad de la Atención en Salud. El MCC debe ser visto como un proceso de autocontrol, el cual debe estar centrado en los pacientes y sus necesidades, identificando continuamente los procesos que resulten susceptibles de mejoramiento, además el enfoque va dirigido a fomentar un pensamiento orientado al perfeccionamiento de los procesos en pro de obtener mejores resultados. [57], [58]

De acuerdo con la Ley 1438 de 2011 del Congreso de la República de Colombia, la Oficina de Calidad del Ministerio de Salud y Protección Social ha construido un Plan Nacional de Mejoramiento de la Calidad en Salud (PNMCS). La calidad esperada representa el establecimiento de metas para los procesos de atención (normas, técnicas y guías), instrumentos (indicadores) y el resultado (metas), este tipo de actividades se realizan con la finalidad de hacer un seguimiento y monitorear el alcance de las metas establecidas (resultados esperados, a donde se quiere llegar). [57]

Resolución Número 1328: PAMEC (Programa de Auditoría para el Mejoramiento de la Calidad de la Atención en Salud), la auditoría puede ser definida como un componente de mejoramiento continuo para el Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad en Salud, es un mecanismo sistemático y continuo de la evaluación y el mejoramiento de la calidad



observada, respecto a la calidad esperada (evaluación del cumplimiento de los estándares de calidad), de acuerdo con la atención en salud que reciben los usuarios. Las instituciones que son obligadas a implementar PAMEC son: Entidades departamentales, distritales y municipales de salud e IPS. El PAMEC representa las actividades de mejoramiento, evaluación, seguimiento de los procesos institucionales que influyen de forma directa en el mejoramiento continuo, la adopción de acciones de mejora para reducir la brecha entre lo observado y lo esperado. [57], [58]

4.4 MARCO TEÓRICO

4.4.1 Índice de conformidad (IC)

El índice de conformidad en la radioterapia es una herramienta útil para realizar una evaluación cuantitativa de la calidad de un plan de tratamiento, mostrando una relación entre el volumen que recibe la dosis administrada y el volumen a tratar, con la finalidad de garantizar una buena cobertura del PTV y una mínima irradiación de los tejidos circundantes, se precisa como el volumen tratado y el volumen del PTV, de acuerdo a esta definición se asume que el volumen tratado (volumen de tejido que recibe al menos la dosis seleccionada y especificada por el equipo de oncología radioterápica) abarca por completo al PTV, el IC tiene como objetivo medir que tan bien se conforma y ajusta la distribución de la dosis para la forma del PTV, el IC asume que el volumen del tumor siempre es de la misma forma que la del blanco, también considera que el centro del volumen de tratamiento siempre está en el centro del blanco, la optimización del IC puede provocar el deterioro de otros parámetros, como el tamaño del volumen irradiado o la homogeneidad de la dosis absorbida en el PTV. [61],[62] El Grupo de Radioterapia Oncológica (RTOG) de acuerdo con sus directrices para radiocirugía en 1993, propusieron un indicador el cual se puede usar para describir la calidad de los planes:

$$IC_{RTOG} = \frac{PIV}{TV} \quad Ec. 2$$

dónde: *PIV* es el volumen de la isodosis de prescripción y *TV* representa el volumen blanco. [62]

En la Figura 10 se muestra una ejemplificación sobre los índices de homogeneidad y conformidad de dosis, el PTV está representado como la estructura de color azul y las estructuras en naranja son el PVR, las líneas discontinuas representan las curvas de isodosis, la homogeneidad representa la uniformidad de la dosis absorbida en el PTV y dentro del DVH se puede observar como una caída de la dosis casi vertical, la conformidad es la medida de la superposición entre la superficie de isodosis y la superficie del PTV. El recuadro 1 muestra como la ponderación desigual del haz trata de proteger los OAR, el recuadro 2 representa la ponderación desigual del haz y el uso de la cuña, el recuadro 3 se observa la



posición del gantry en varios ángulos para administrar el haz con ponderación variable. Por último, el 4 recuadro indica el efecto de la separación del gantry de 180° y la falta de evitación de los OAR. [29]

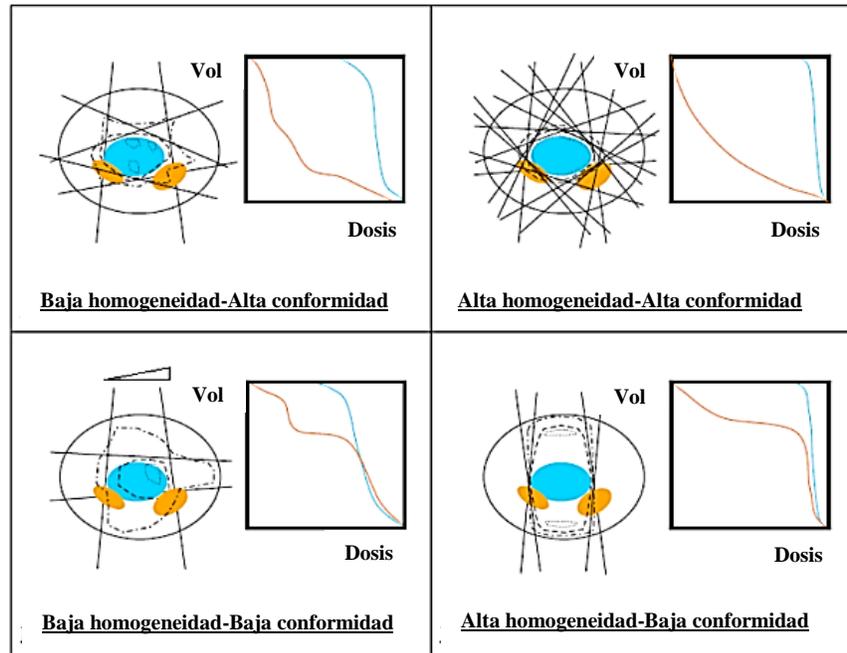


Figura 10.. Representación del IC e IH para un PTV. Tomado de ICRU 83 [29]

Adicionalmente, en la siguiente tabla tienen las tolerancias definidas para el IC definido por la RTOG:

Tabla 9 Tolerancias para IC propuesto por RTOG.

IC	Observación	Clasificación
$IC = 1$	Conformación ideal	Plan perfecto
$IC > 1$	Indica que el volumen irradiado es mayor que el volumen blanco	Sobreirradiación
$IC < 1$	El volumen es parcialmente irradiado	Subirradiación
$1 < IC < 2$	El tratamiento cumple con el plan de tratamiento	
$2 < IC < 2.5$ o $0.9 < IC < 1$	Afecta el protocolo, pero en una proporción pequeña	
$IC < 0.9$ o $IC > 2.5$	Viola completamente el protocolo	

4.4.2 Índice de homogeneidad (IH)

El índice de homogeneidad es una herramienta usada para evaluar la uniformidad de la distribución de la dosis en el PTV, uno de los objetivos principales de la radioterapia es entregar la máxima dosis en el volumen blanco de forma homogénea buscando evitar la



irradiación de los tejidos circundantes que no se encuentran afectados por la patología, es una medida de las diferencias de dosis dentro del blanco tumoral dependiendo de la dosis máxima,

$$IH = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}} \quad \text{Ec. 3}$$

donde D2% representa la dosis máxima entregada al 2% del volumen del PTV, D98% es la dosis mínima entregada al 98% del volumen del PTV y D50% dosis absorbida en el 50% del volumen. $IH = 0$ representa una dosis homogénea en el objetivo. [29]

4.4.3 Índice de evaluación Gamma

El índice de evaluación Gamma es un parámetro utilizado para comparar datos dosimétricos obtenidos en el equipo y los datos planeados como se observa en la Figura 11, es un método que se emplea con mucha frecuencia con la finalidad de detectar errores de dosificación en los tratamientos y a su vez realizar la verificación de parámetros de calidad de la distribución de la dosis dentro del volumen irradiado. [63]

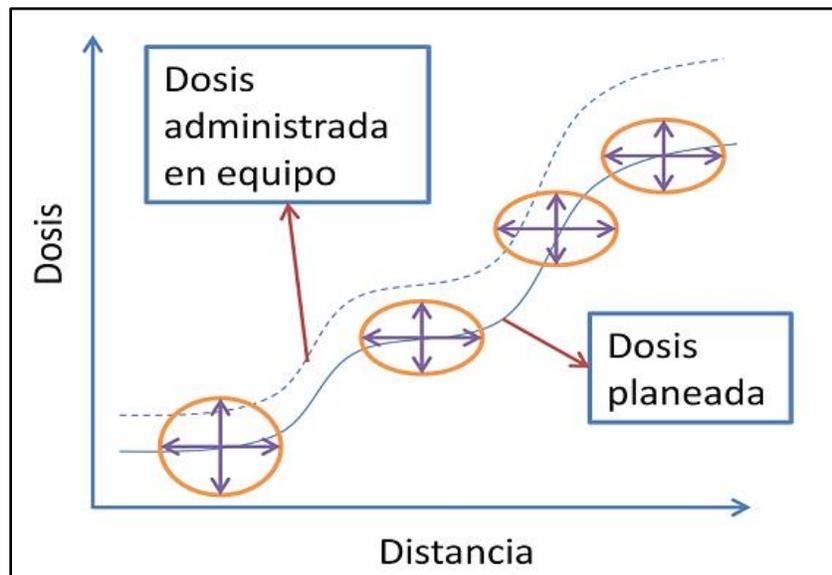


Figura 11.. Representación de la evaluación de los criterios que componen el índice Gamma. Tomado de Evaluación y control de calidad de tratamientos de radioterapia mediante la utilización de dosimetría portal [63]

El índice gamma principalmente se encuentra definido a través de dos componentes importantes, el primero se define como la diferencia de dosis entre dos puntos de la distribución, esta medida tiene un importante valor en las regiones de bajo gradiente, compara punto a punto la dosis en ambas distribuciones, mientras que en las zonas de alto gradiente puede apreciarse diferencias significativas. El segundo criterio que hace uso el índice es la



distancia al acuerdo (distance to agreement-DTA), distancia entre dos puntos con la misma distribución de dosis dentro de un área definida. [63]

Este índice gamma permite la combinación de estos dos criterios para determinar si los puntos evaluados son aceptables o no. Los tratamientos con haces modulados están constituidos por regiones de bajo y alto gradiente, por lo tanto, si un punto evaluado se encuentra dentro de la tolerancia de alguno de los dos criterios se considera como aprobado. La definición de este índice se hace con un modelo matemático donde se tiene un espacio con las dosis y las distancias físicas como coordenadas, con el criterio de diferencia de dosis (DD) y la distancia de coincidencia (DTA) se forma un elipsoide. [64]

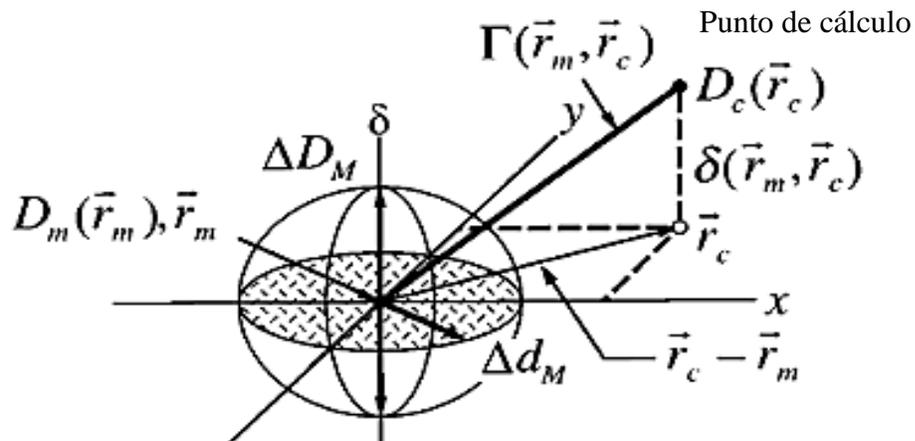


Figura 12.. Representación del modelo matemático del índice Gamma. Tomado de A technique for the quantitative evaluation of dose distributions [64]

La diferencia de dosis aceptada de DD se expresa como ΔD_M y la desviación espacial aceptada es Δd_M . Los criterios de ubicación y dosis, Δd_M y ΔD_M son establecidos por el usuario, la aprobación se debe validar si al menos el 95% de los puntos cumplen con los criterios de $\Delta d_M = 3 \text{ mm}$ y $\Delta D_M = 3 \%$, estos criterios definen la desviación admisible. El elipsoide Gamma se define como:

$$1 = \sqrt{\frac{r^2(r_m, r)}{\Delta d_M^2} + \frac{\delta^2(r_m, r)}{\Delta D_M^2}} \quad \text{Ec. 4}$$

donde la desviación espacial está dada por la distancia entre el punto de partida y el punto con el que se hace la comparación,

$$r(r_m, r) = |r - r_m| \quad \text{Ec. 5}$$

y la desviación en dosis entre los dos puntos comparados es

$$\delta^2(r_m, r) = D(r) - D_m(r_m) \quad \text{Ec. 6}$$



donde $D_m(r_m)$ representa la distribución de dosis medida en las posiciones r_m y $D(r)$ la distribución de dosis calculada con el planificador en las posiciones r . [64]

El valor mínimo de la distancia Gamma entre los diferentes puntos del entorno del planificador es el valor del índice Gamma asociado al punto de medida:

$$\gamma(r_m) = \min\{\Gamma(r_m, r_c)\} \forall \{r_c\} \quad \text{Ec. 7}$$

Γ se calcula como la distancia euclidiana, normalizada por los criterios de aceptación para cada punto, la función gamma se representa como:

$$\Gamma(r_m, r_c) = \sqrt{\frac{r^2(r_m, r_c)}{\Delta d_M^2} + \frac{\delta^2(r_m, r_c)}{\Delta D_M^2}} \quad \text{Ec. 8}$$

Criterio de evaluación:

$\gamma(r_m) \leq 1$ aceptable

$\gamma(r_m) > 1$ fuera de tolerancia

En el desarrollo del presente estudio se va a usar la definición del índice Gamma, pero para determinar las desigualdades existentes entre los planes de tratamiento, por tanto, se define la siguiente ecuación:

$$IG_{dif} = 1 - \gamma(3\%/3mm) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde IG_{dif} , representa la diferencia dosimétrica existente entre los planes de tratamiento que se vayan a analizar.

4.4.4 Constraints para la evaluación de OAR's

De acuerdo con la información de los diferentes protocolos para el cáncer de próstata se han adaptado los constraints para la institución de acuerdo con las necesidades de esta misma, para ello se definen los límites de tolerancia para los órganos en riesgo de la pelvis para dosis de prescripción de 7000 cGy, 6750 cGy y 6000 cGy como se muestra en la Tabla 10. Adicionalmente a cada uno de estos parámetros se les asigna un respectivo código para posteriormente realizar el respectivo análisis, como se muestra a continuación:



Tabla 10.. Constraints para cáncer de próstata, para dosis de prescripción de 7000 cGy, 6750 cGy y 6000 cGy

ESTRUCTURA	CÓDIGO	CONSTRAINT (7000cGy y 6750 cGy)	CONSTRAINT (6000cGy)
BULBO PENENAO	C1	V 4000 cGy ≤ 40 %	V 4080 cGy ≤ 50 %
	C2	V 5000 cGy ≤ 20 %	V 4860 cGy ≤ 25 %
	C3	Dmean ≤ 5200 cGy	Dmax ≤ 5000 cGy
CABEZA FEMORAL DERECHA	C4	Dmax ≤ 6800 cGy	
	C5		V 4080 cGy ≤ 50 %
	C6	V 5000 cGy ≤ 10 %	V 5000 cGy ≤ 10%
CABEZA FEMORAL IZQUIERDA	C7	Dmax ≤ 6800 cGy	
	C8		V 4080 cGy ≤ 50 %
	C9	V 5000 cGy ≤ 10 %	V 5000 cGy ≤ 10%
INTESTINO DELGADO	C10	D 0,1 cc ≤ 5000 cGy	
	C11		V 4080 cGy ≤ 17 cc
MÉDULA	C12	Dmax ≤ 4500 cGy	Dmax ≤ 4500 cGy
	C13	V 7000 cGy ≤ 10 cc	
RECTO	C14	V 7000 cGy ≤ 10 %	V 6000 cGy ≤ 3 %
	C15	V 6500 cGy ≤ 22 %	V 5700 cGy ≤ 15 %
	C16	V 4000 cGy ≤ 52 %	V 5280 cGy ≤ 30 %
	C17		V 4860 cGy ≤ 50 %
	C18		V 4080 cGy ≤ 60 %
	C19	V 6500 cGy ≤ 10 %	V 6000 cGy ≤ 5 %
VEJIGA	C20	D 50% ≤ 5000 cGy	
	C21		V 4860 cGy ≤ 25 %
	C22		V 4080 cGy ≤ 50 %

4.4.5 Puntuación de planeación

La posibilidad de determinar si un plan es mejor que otro, va de la mano en determinar la calidad de un plan, por tanto, teniendo en consideración algunos de los métodos de puntuación, se tienen algunas características en común con las cuales se tratan de identificar las métricas pertinentes que se van a extraer del DVH, estas posteriormente son comparadas con los objetivos establecidos inicialmente y se realiza el respectivo estudio. Además, es importante establecer una función de puntuación por cada métrica, es decir, la evaluación individual de los parámetros adquiridos del histograma dosis volumen, para obtener por cada métrica un nivel de desempeño, al final de la evaluación estas mismas se suman para finalmente obtener una puntuación global. [65] [66]

Las funciones de puntuación pueden ser bastante elaboradas, como por ejemplo líneas con varias pendientes e inclusive con curvas, o por el contrario se pueden establecer de forma simple como líneas desde una puntuación de cero para el resultado mínimo requerido hasta una puntuación máxima para el resultado ideal.

Para establecer la función de puntuación se considera los límites de los constraints y los valores mínimos obtenidos para estos mismos de acuerdo con la evaluación del DVH para definir los intervalos dentro de los cuales se genera una determinada puntuación, adicionalmente se toma en consideración la cobertura de cada uno de los PTV's y la dosis que recibe el tejido circundante denominado body. Por tanto, cada uno de los planes de tratamiento tiene su respectiva ponderación dependiendo de la dosis de prescripción, para esto se establece la Tabla 11 en la cual se consigna la información correspondiente a las métricas que se van a evaluar, además de mostrar los valores mínimos y máximos que puede tomar cada uno de los parámetros, con los cuales se realizó una interpolación para los datos que se encuentren dentro del intervalo de aceptación, para finalmente generar un puntaje global. [65] [66]



Tabla 11.. Establecimiento de límites de tolerancia para construcción de la función de puntuación

DOSIS		7000 cGy		6750 cGy		PUNTAJE	
PARÁMETROS		IDEAL	ACEPTABLE	IDEAL	ACEPTABLE	MAX	MIN
PTV1	D95%	7000 cGy	6650 cGy	6750 cGy	6413 cGy	15	1
	D2%	7490 cGy	7700 cGy	7223 cGy	7425 cGy	10	1
PTV2	D95%	6160 cGy	5852 cGy	5942 cGy	5645 cGy	15	1
	D2%	6591 cGy	6776 cGy	6358 cGy	6536 cGy	10	1
PTV3	D95%	5040 cGy	4788 cGy	4860 cGy	4617 cGy	15	1
	D2%	5393 cGy	5544 cGy	5200 cGy	5346 cGy	10	1
BP	V4000cGy	0,0%	40,0%	0,0%	40,0%	4	1
	V5000cGy	0,0%	20,0%	0,0%	20,0%	4	1
	DMEAN	300 cGy	5200 cGy	300 cGy	5200 cGy	3	1
CFD	DMAX	2500 cGy	6800 cGy	2500 cGy	6800 cGy	4	1
	V5000cGy	0,0%	10,0%	0,0%	10,0%	3	1
CFI	DMAX	2500 cGy	6800 cGy	2500 cGy	6800 cGy	4	1
	V5000cGy	0,0%	10,0%	0,0%	10,0%	3	1
INT	D0,1cc	100 cGy	5000 cGy	100 cGy	5000 cGy	2	1
MED	DMAX	50 cGy	4500 cGy	30 cGy	4500 cGy	8	1
RECTO	V7000cGy	0 cc	10 cc	0 cc	10 cc	7	1
	V700cGy	0,0%	10,0%	0,0%	10,0%	7	1
	V6500cGy	5,0%	22,0%	0,5%	22,0%	5	1
	V4000cGy	16,0%	52,0%	12,0%	52,0%	5	1
VEJIGA	V6500cGy	0,5%	10,0%	2,0%	10,0%	6	1
BODY	D50%	200 cGy	5000 cGy	100 cGy	5000 cGy	5	1
	D0,1cc	107,0%	110%	107,0%	110%	3	1
BODY	V107%	1 cc	2 cc	1 cc	2 cc	2	1

DOSIS		6000 cGy		PUNTAJE	
PARÁMETROS		IDEAL	ACEPTABLE	MAX	MIN
PTV1	D95%	6000 cGy	5700 cGy	15	1
	D2%	6420 cGy	6600 cGy	10	1
PTV2	D95%	5400 cGy	5130 cGy	15	1
	D2%	5778 cGy	5940 cGy	10	1
BP	V4080cGy	0,0%	50,0%	3	1
	V4860cGy	0,0%	25,0%	4	1
	DMAX	300 cGy	5000 cGy	4	1
CFD	V4080cGy	0,0%	50,0%	3	1
	V5000cGy	0,0%	10,0%	4	1
CFI	V4080cGy	0,0%	50,0%	2	1
	V5000cGy	0,0%	10,0%	4	1
INT	V4080cGy	0 cc	17 cc	2	1
MED	DMAX	100 cGy	4500 cGy	9	1
	V6000cGy	0,0%	3,00%	8	1
	V5700cGy	3,0%	15,0%	7	1
	V5280cGy	10,0%	30,0%	7	1
RECTO	V4860cGy	20,0%	50,0%	5	1
	V4080cGy	25,0%	60,0%	5	1
	V6000cGy	0,5%	5,0%	6	1
VEJIGA	V4860cGy	10,0%	25,0%	6	1
	V4080cGy	20,0%	50,0%	5	1
BODY	D0,1cc	107,0%	110,0%	3	1
	V107%	1 cc	2 cc	2	1

Asimismo, se configura la evaluación de los planes gracias a rangos establecidos con los resultados obtenidos luego de la evaluación de las métricas y la evaluación global, para asignar una descripción para el plan, por ejemplo: inaceptable, aceptable bueno e ideal. En el estudio se definieron tres categorías, con las cuales se puede calificar al plan de tratamiento como un plan: óptimo, aceptable y no aceptable, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12.. Asignación de descripción de los planes: óptimo, aceptable y no aceptable.

PUNTAJE [%]	CATEGORÍA
PUNTAJE \geq 90.0%	ÓPTIMO
70.0% \leq PUNTAJE < 90.0%	ACEPTABLE
PUNTAJE < 70.0%	NO ACEPTABLE



5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar la planeación de cáncer de próstata mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización multicriterio en un hospital público de mediana y alta complejidad del suroccidente colombiano, 2023.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir los registros de pacientes de cáncer de próstata según condiciones demográficas, estadios, dosis de tratamiento, parámetros de planeación y otras.
2. Establecer el modelo de planeación basado en el conocimiento usando los planes de tratamiento de próstata optimizados con optimización multicriterio (MCO).
3. Evaluar la relación entre los planes del modelo de la planificación basada en el conocimiento y los planes originales de los registros de cáncer de próstata.



6 METODOLOGÍA

6.1 TIPO DE ESTUDIO

El desarrollo de este trabajo es del tipo descriptivo de cohorte retrospectivo de los registros del sistema de planeación de tratamientos de radioterapia que hayan tratado cáncer de próstata, realizados originalmente y los desarrollados con el modelo entrenado con la base de datos de pacientes tratados con anterioridad, los cuales están constituidos por los registros de pacientes del periodo de 01 de enero de 2020 a 30 de junio de 2023.

Para la implementación de RapidPlan en combinación con MCO se inició con la respectiva validación de los planes de tratamientos realizados a pacientes masculinos con cáncer de próstata, estos deben tener definidos los volúmenes objetivo de planificación (PTV) y los respectivos órganos a riesgo, estos principalmente fueron optimizados con el programa de MCO, posteriormente se procedió a alimentar la base de datos de IA de Rapidplan con dichos planes, a continuación, se ejecutó el algoritmo de RapidPlan en el grupo de planes de tratamiento elegidos de forma aleatoria para ser optimizados con el modelo, tanto para la validación como para la verificación.

6.2 ÁREA DE ESTUDIO

El estudio fue llevado a cabo en el Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E”, ciudad de Cali, en el servicio de radioterapia en el área de física médica, haciendo uso de la inteligencia artificial en el entrenamiento del modelo de planeación basado en el conocimiento en combinación con la optimización multicriterio para cáncer de próstata en sus diferentes estadios: riesgo bajo, riesgo intermedio y alto riesgo con la información de pacientes tratados anteriormente y su posterior confrontación con los datos obtenidos con la planificación manual.

6.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

6.3.1 Población objeto

La población objetivo se centró en los datos de los registros de pacientes con diagnóstico de cáncer de próstata que recibieron tratamiento de radioterapia en el servicio de Radioterapia del Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E”, de acuerdo con los datos registrados en la agenda de programación de inicio de tratamiento de radioterapia según el sistema de información ARIA-ECLIPSE.



6.3.2 Población de estudio

La población de estudio se basó en los registros de los planes de tratamiento con radioterapia de los pacientes con diagnóstico de cáncer de próstata que fueron tratados en el Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E” durante el período de 01 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2023 que cumplieron conforme a la respectiva evaluación de los criterios de inclusión y exclusión establecidos en el proyecto.

6.3.3 Criterios de inclusión

Se tuvieron en consideración los siguientes criterios de inclusión durante la ejecución del estudio:

1. Pacientes con CIE-10 con código C61X (cáncer de próstata).
2. Registro de planes de tratamiento con curso denominado CA PROSTATA.
3. Registro de planes de tratamiento planeados con la técnica de modulación de dosis VMAT o IMRT.
4. Registro de planes de tratamiento que se encuentren en la base de datos de ARIA ECLIPSE del Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E” que al menos hayan iniciado tratamiento durante el tiempo establecido para el estudio.

Luego de revisar la información correspondiente respecto a los registros de tratamiento de cáncer de próstata que se encuentran dentro del periodo de estudio registrados en el sistema ARIA-ECLIPSE se procede a evaluar los criterios de inclusión, se obtuvieron 336 registros que cumplen con dichas condiciones.

6.3.4 Criterios de exclusión

Los datos que se excluyeron en el estudio cumplieron con los siguientes criterios:

1. Registros de pacientes con prótesis metálicas.
2. Registro de pacientes con modelo de planeación secuencial.
3. Registros de pacientes que no tengan los OAR.
4. Pacientes con cáncer de próstata con ganglios positivos (N+) descritos con un PTV diferente.
5. Planes que no cumplan con la dosis prescrita al PTV de $D_{95\%} \geq 100\%$ con una variación aceptable de $D_{95\%} \geq 95\%$.
6. Planes que no cumplan con una dosis máxima en el PTV de $D_{max} \leq 107\%$ con una variación aceptable de $D_{max} \leq 110\%$.
7. Registros de pacientes con volúmenes de OAR atípicos.



Tras evaluar los criterios de exclusión al grupo de los 336 registros se obtuvieron 33 registros de tratamiento que satisfacen con dichas condiciones, por lo tanto; se determinó el tamaño de la población, el cual fue conformado por los 303 registros de tratamiento restantes.

6.4 MUESTRA

Los planes de tratamiento elegidos para la validación del modelo fueron los que se encontraron en el base institucional ARIA-ECLIPSE con diagnóstico de cáncer de próstata con tratamiento de radioterapia que cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión y que fueron elegidos aleatoriamente para realizar el plan de análisis del funcionamiento del modelo de planeación, dentro del periodo de tiempo de estudio de 01 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2023. Para determinar el tamaño de la muestra se usó la Ec. 10, definida para determinar el tamaño muestral de un estudio de cohorte retrospectiva [67]:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)} \quad \text{Ec. 10}$$

donde:

N : representa el tamaño de la población, con 303 registros de pacientes.

Z : representa el nivel de confianza, describe la desviación del valor medio que se acepta para lograr el nivel de confianza, para el presente estudio fue del 95% (al hacer experimentos semejantes con el mismo tipo de muestra, el 95% de los datos se encontrarán dentro del margen, mientras el 5% restante se encontrará fuera de este), por tanto, genera el coeficiente de confianza de $Z = 1.96$.

p : representa la probabilidad de éxito o proporción esperada que se desea medir, se usó el 50%, ya que, se desconoce dicha proporción que se desea encontrar.

e : representa el error máximo admisible en términos de proporción, margen de error deseado de 5%. [67]

Finalmente, al reemplazar los respectivos parámetros en la Ec. 10, se obtuvo el tamaño de muestra de 170 registros de planes de tratamiento de cáncer de próstata que se usaron para desarrollar el estudio.

6.4.1 Variables

Las variables independientes y dependientes que se consideraron en el estudio fueron las siguientes:



6.4.1.1 Variable dependiente

Dentro de la investigación se definió la siguiente variable dependiente, con la finalidad de dar cumplimiento con uno de los objetivos específicos del estudio, para realizar la evaluación de calidad entre los planes generados por el modelo y los planes realizados de forma manual para cáncer de próstata. Esta está definida en el Tabla 13, donde se tiene la clasificación por categoría (Ctg), variable, definición, tipo de variable (Tipo), valores (Val) y el método de recolección (MR).

Tabla 13 Definición de la variable dependiente

Ctg	Variable	Definición	Tipo	Val	MR
Calidad del plan	Calidad del plan modelado	Logra tener mejores o iguales indicadores de calidad respecto al plan original. Se considera que el criterio cumple cuando se logra alcanzar 4 de las 5 evaluaciones de las variables independientes categorizadas como calidad del plan.	Cualitativa nominal dicotómica	1. Sí 2. No	DVH

6.4.1.2 Variables independientes

Las variables independientes que se definieron para la investigación se usaron para evaluar los efectos que producen en la variable dependiente.

Tabla 14 Definición de variables independientes.

Ctg	Variable	Definición	Tipo	Val	MR
Demográfica	Edad	Edad al inicio de tratamiento.	Cuantitativa discreta	Años	ARIA-Eclipse, Historia clínica
	Estadios ca de próstata	Diagnóstico definido por parte del médico tratante: <ol style="list-style-type: none"> Bajo riesgo: en esta clasificación el tumor se encuentra confinado solamente en la próstata. Riesgo intermedio: hay compromiso tanto de la próstata como de las vesículas. Alto riesgo: el tumor se extiende tanto a la próstata como a las vesículas y los ganglios. 	Cualitativa ordinal	<ol style="list-style-type: none"> Bajo riesgo Riesgo intermedio Alto riesgo 	Historia clínica



Ctg	Variable	Definición	Tipo	Val	MR
	Volumen tumoral y de OAR	Medición de los volúmenes de cada una de las estructuras: 1. Volumen próstata 2. Volumen vesículas 3. Volumen ganglios 4. Volumen vejiga 5. Volumen recto 6. Volumen cabeza femoral derecha 7. Volumen cabeza femoral izquierda 8. Volumen bulbo peneano 9. Volumen intestino delgado 10. Volumen médula	Cuantitativa de razón	cm^3	Eclipse
	Dosis de prescripción	Se define como la dosis máxima de prescripción.	Cuantitativa ordinal	1. 6000 cGy 2. 6750 cGy 3. 7000 cGy	Eclipse
	Esquema SIB	Se definen los diferentes esquemas de tratamiento: - Esquema 1: (7000, 6160, 5040) cGy - Esquema 2: (7000, 6160) cGy - Esquema 3: (6000, 5400) cGy - Esquema 4: (7000) cGy - Esquema 5: (6750) cGy - Esquema 6: (6000) cGy - Esquema 7: Otro	Cuantitativa nominal politómica	1. Esquema 1 2. Esquema 2 3. Esquema 3 4. Esquema 4 5. Esquema 5 6. Esquema 6 7. Otro	Eclipse
Calidad de planeación	Constraints	Evaluación de los límites de tolerancia de los OAR según la dosis de prescripción, estos fueron consignados en la Tabla 10.	Cuantitativa nominal dicotómica	1. Cumple 2. No cumple	DVH-Eclipse
			Cuantitativa de razón	cGy, % ó cc	



Ctg	Variable	Definición	Tipo	Val	MR
	Parámetros de planeación	Cumple con al menos 13 de los 15 (dosis de 6750 cGy o 7000 cGy) y 15 de los 17 (dosis de 6000 cGy) constraints establecidos para el estudio.	Cualitativa nominal dicotómica	1. Cumple 2. No cumple	Eclipse
	Índice de conformidad	Es la medición de qué tan bien se conforma la distribución de la dosis a la forma y tamaño del volumen blanco, definido con un intervalo de variación de: $0.9 \leq IC \leq 1.1$ Cumple el criterio sí IC está dentro del intervalo de 0.9 a 1.1, caso contrario no cumple con este.	Cualitativa nominal dicotómica	1. Cumple 2. No cumple	DVH-Eclipse
			Cuantitativa de razón	Número racional positivo	
	Índice de homogeneidad	Describe la uniformidad de la dosis en el volumen blanco, con un intervalo de variación de: $0 \leq IH < 0.2$ Cumple el criterio de IH sí se encuentra dentro del intervalo de 0 a 0.2, caso contrario no cumple con este.	Cualitativa nominal dicotómica	1. Cumple 2. No cumple	DVH-Eclipse
			Cuantitativa de razón	Número racional positivo	
	Índice Gamma	Herramienta para la comparación de planes entre el plan de tratamiento planeado inicialmente vs el optimizado. El cual se evalúa con: $\gamma(3 \%, 3 \text{ mm})$ Dentro del control de calidad se toma el total de puntos como el 100%, en los cuales se hace la evaluación Gamma, para aprobar el plan es necesario que el 95% de los puntos que se evalúan cumplan con el índice Gamma.	Cualitativa nominal	1. Cumple 2. No cumple	Software VeriSoft
			Cuantitativa de razón	%	



6.5 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La información correspondiente a la población objetivo se obtuvo al hacer uso de la agenda del servicio de radioterapia la cual relaciona los inicios de tratamiento de pacientes masculinos con diagnóstico de cáncer de próstata durante el periodo correspondiente a 01 de enero de 2020 hasta el 30 de junio de 2023 por medio del Software de Aria Medical System, los datos fueron registrados y organizados en una base de datos para su posterior procesamiento, luego de determinar el tamaño de la muestra. Por otra parte, la información demográfica de los pacientes fue recolectada de la base de datos respectiva de las historias clínicas ARIA-ECLIPSE manteniendo la confidencialidad de los pacientes (asignándoles un código), la información correspondiente fue capturada y diligenciada en la base de datos del Anexo N°1, respecto a los datos de los registros de planes de tratamiento se obtuvieron a través de Eclipse, estos también fueron consignados en el Anexo 1 (Registro planes de tratamiento para cáncer de próstata), para posteriormente realizar los análisis respectivos, la información fue recolectada por el investigador principal, los datos fueron registrados y organizados en las instalaciones del servicio de Radioterapia del Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E”.

6.6 PLAN DE ANÁLISIS

En la investigación se realizó el análisis tanto de variables cuantitativas como cualitativas, dentro de las variables independientes se encuentran las categorizadas como variables demográficas entre las cuales se tienen: edad, estadio y volumen tumoral y de OAR, estas son definidas para realizar una descripción general de la población que recibe tratamiento para cáncer de próstata. Por lo tanto; se desarrolló un análisis descriptivo de dichas variables, para las variables cualitativas ordinales se realizaron gráficas de frecuencia, mientras que para las variables cuantitativas discretas y de razón se realizó una estadística de las medidas de tendencia central, medidas de dispersión, la elección de estas medidas de tendencia central se definió luego de realizar las respectivas pruebas para determinar si los datos tenían una distribución normal o no, por tanto; para las variables con datos menores a 30 se usó la prueba de Shapiro-Wilk y para variables con más de 30 datos se ejecutó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, posteriormente de determinar el comportamiento de los datos se continúa con la elaboración de histogramas y análisis a través de diagramas de cajas para observar el comportamiento de estas variables.

Para las variables categorizadas como calidad de planeación, se tiene los parámetros de planeación (constraints), con estos se realizó la respectiva evaluación de los límites de dosis para los órganos a riesgo los cuales están definidos de acuerdo con los protocolos PROFIT, CHHiP y RTOG 0415, de estos se han extraído dichas tolerancias y se ha establecido dos protocolos para adaptarlos a las necesidades del servicio de radioterapia del hospital. El análisis respectivo inició con la revisión de los registros de los planes de



tratamiento, de estos se extrajo la información del respectivo valor de cada uno de los constraints de los órganos a evaluar dependiendo de la dosis de prescripción, con la cual se puede determinar cuál de las columnas de la Tabla 10 de límites de tolerancia usar.

Para la planificación del cáncer de próstata se creó un modelo de planeación, el cual fue configurado de acuerdo con dos fases, inicialmente el tamaño de la muestra fue de 170 registros, seguidamente se formaron dos grupos, el primero fue constituido por 140 registros de tratamiento los cuales se usaron en el entrenamiento y la verificación de los modelos de planeación, conformados por planes de tratamiento en sus diferentes estadificaciones: 41, 49 y 50 registros de tratamiento de bajo riesgo, riesgo intermedio y alto riesgo respectivamente. Mientras el segundo grupo fue conformado por 30 registros de tratamiento constituidos por 10 registros por cada estadificación (bajo riesgo, riesgo intermedio y alto riesgo), denominados planes de validación.

En primer lugar, se extrajo la información de las bases de datos de los registros de planes que se encontraban dentro del periodo de estudio (170 registros), éstos estaban relacionados a un conjunto de estructuras, dosis y geometrías de campo. Seguidamente se realizó el entrenamiento del modelo de RapidPlan V1.0 con los 140 planes originales de los registros de tratamiento, el modelo usa la información de cada uno de los planes para luego estimar los DHV de los órganos en riesgo y genera un nuevo plan constituido gracias a la información extraída del banco de datos aportado inicialmente. [39] A continuación, del entrenamiento del modelo 1 dichos planes de tratamiento fueron planificados nuevamente con la técnica VMAT utilizando el primer modelo, el plan resultante se denominó RP V1.0 (RP1), el cual se usó para el respectivo análisis. Seguidamente los planes fueron modificados y sometidos a la exploración de soluciones alternativas con la ayuda de MCO, para crear un plan denominado RP V1.0+MCO, con estos planes se genera y entrena un nuevo modelo de planeación final (Anexo 2), los 140 registros de pacientes fueron planificados nuevamente con el modelo en cuestión, obteniendo como resultado los planes denominados RP+MCO (RP2). Adicionalmente con este modelo se realizó el respectivo plan de tratamiento para los planes de validación. Por lo tanto; los planes que se usaron en el análisis de las variables de planeación fueron: plan inicial (PI), RP V1.0 (RP1) y RP+MCO (RP2).

De los planes verificados con los modelos de planeación, modelo 1 y modelo 2 se recolectaron los parámetros de los respectivos histogramas dosis-volumen, a continuación, se extrajeron los datos correspondientes para la determinación de los índices de homogeneidad (IH) y conformidad (IC) para los diferentes volúmenes objetivo. Seguidamente se obtuvo la información correspondiente a la evaluación del índice Gamma. A continuación, se llevó a cabo el respectivo análisis estadístico de dichas variables independientes, dentro de las cuales se encuentran las medidas de dispersión, gráficos de cajas, diagramas de frecuencia y determinación de la desviación estándar.

Se efectuó la respectiva evaluación estadística de las variables independientes de la categoría de calidad del plan de la planeación usando el modelo propuesto en la investigación vs la planeación manual con la finalidad de contribuir a la evaluación de la variable



dependiente, con la cual se busca determinar si la implementación del modelo de planeación conduce a un mejoramiento de la calidad en la planeación de los planes de tratamiento con el modelo vs los que se realizan de forma manual. Donde se requiere que los datos de los planes elaborados con el modelo cumplan con los parámetros de tolerancia establecidos con las variables de calidad, además, si estos lograban obtener iguales o mejores indicadores de calidad que los planes originales, se categorizaban como cumplimiento de la calidad del plan.

Para la evaluación de los constraints de los planes generados con los modelos se hizo un análisis multivariado con el uso de odds ratio, para determinar si el modelo 2 mejora los límites de tolerancia respecto a las métricas del modelo 1.

6.6.1 Flujograma del método de análisis

A continuación, se presenta un flujograma (Figura 13) en el cual se puede observar el procedimiento necesario para la obtención de los planes de tratamiento que fueron analizados (plan inicial, RP V1.0 y RP+MCO) en el presente trabajo.

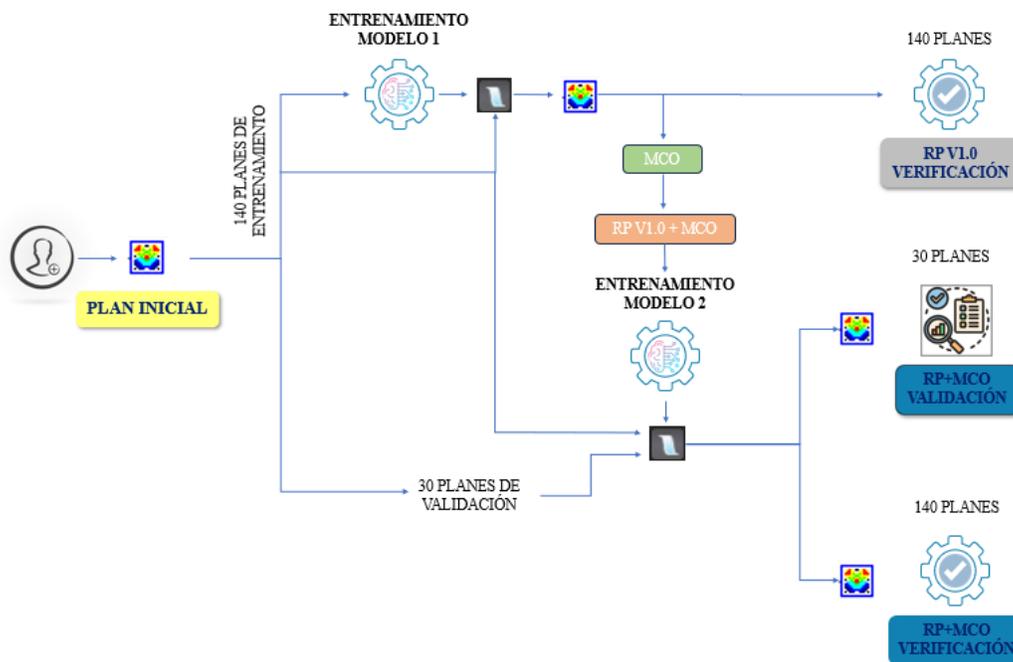


Figura 13.. Flujograma de la obtención de planes de tratamiento (plan inicial, RP V1.0 y RP+MCO)

6.6.2 Fortalezas y limitaciones

6.6.2.1 Fortalezas:

El proyecto de investigación se planteó en aras de estandarizar la planeación de tratamientos en el servicio de radioterapia, iniciando con el cáncer de próstata, considerando que entre los objetivos relevantes se encuentra la disminución de la dosis entregada a los



órganos a riesgo y la distribución de esta lo más homogénea posible. Al hacer uso de las herramientas (algoritmos de planeación) disponibles en la institución se busca lograr generar planes de tratamiento a través del entrenamiento de un modelo de planeación, el cual se basa en planes entregados con anterioridad, gracias a las geometrías de las estructuras anatómicas con las cuales se alimenta el modelo y las respectivas distribuciones de dosis, el cual va encaminado en lograr reducir las dosis entregadas a los órganos a riesgo y la administración de una distribución de dosis más localizada en los objetivos. Para el servicio de radioterapia sería de gran importancia la implementación de un modelo de planeación de esta índole, ya que, contribuye a la entrega de tratamientos de altos estándares de calidad y con una probable disminución de morbilidad en los pacientes.

La investigación se basa en estudios que se han realizado al respecto, los cuales han demostrado que la contribución para los servicios de radioterapia ha resultado ser significativa, debido a que, se puede observar buenos resultados en la optimización del tiempo de planeación como en la disminución de la dosis en órganos a riesgo, como se referencia en el apartado del estado del arte del presente proyecto. Se inicia con el modelo para próstata, sin embargo; dentro del servicio se busca implementar más modelos para las diferentes regiones anatómicas, tales como: cérvix, cabeza y cuello, recto, entre otros.

6.6.2.2 *Limitaciones:*

La geometría de las estructuras representa una limitación; debido a que, depende de cada uno de los médicos o dosimetristas que se encarguen de contornear, por esto, estas tienen una variabilidad que se puede ver reflejada en el funcionamiento del modelo.

Considerando que en el proyecto se incluyeran todos los pacientes que se obtienen durante el periodo de tiempo establecido y evaluando los criterios de exclusión, el tamaño de la población conlleva a una limitación de tiempo para la ejecución, debido a que, la recolección de los respectivos datos es algo prolongada, además el agregar muchas estructuras en el modelo, lo puede volver menos estricto, generando flexibilidad en este mismo. Dentro de las limitaciones más evidentes se encuentra la cantidad de licencias disponibles de los algoritmos de cálculo utilizados para llevar a cabo el proyecto (RapidPlan y MCO), ya que, se cuenta con un número limitado, por lo tanto, hace que el desarrollo del modelo sea algo prolongado.

6.6.3 Control de sesgos

Sesgos de información que será controlado eliminando los registros que se encuentren con gran cantidad de valores faltantes, garantizando así que los resultados reflejen la población de estudio.



6.7 CONSIDERACIONES ÉTICAS

El trabajo de investigación se llevó a cabo dentro de las instalaciones del Hospital Universitario del Valle “Evaristo García E.S.E”, en la capital del departamento del Valle del Cauca, haciendo énfasis en las consideraciones bioéticas de investigación que relacionan la salud para los seres humanos de acuerdo con la Declaración de Helsinki (2002) “Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial, Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos”, dentro del ámbito Nacional nos regimos bajo la Resolución No. 008430 de octubre de 1993 de la República de Colombia por parte del Ministerio de Salud “Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas, administrativas para la investigación en la salud”.

De acuerdo con la Resolución No.008430 de 1993 del Ministerio de Salud, Título II capítulo 1 “De los aspectos éticos de la investigación en seres humanos” Artículo 11, se dicta la clasificación de las investigaciones dentro de la cual se encuentra la categoría que aplica al estudio en cuestión:

Investigación sin riesgo: se usa para determinar estudios que emplean técnicas y métodos de investigación documental retrospectivo y aquellos en los que no se realiza ninguna intervención o modificación intencionada de las variables biológicas, fisiológicas, psicológicas o sociales de los individuos que participan en el estudio, entre los que se consideran: revisión de historias clínicas, entrevistas, cuestionarios y otros en los que no se identifique ni se traten aspectos sensitivos de su conducta. [68]

Posteriormente se realizaron los trámites pertinentes para pedir la autorización y por consiguiente la aprobación de la propuesta de investigación por parte del Comité de Ética, otorgada mediante el Anexo 3 (Carta y acta de aprobación del proyecto por parte del Comité de Ética en Investigaciones), para obtener permiso para acceder a los datos de Aria-Eclipse y las historias clínicas de la base de datos del servicio de radioterapia de los pacientes involucrados en el proyecto, debido a que se hizo uso de una base de datos de registros de planes de tratamiento administrados con anterioridad el consentimiento informado fue diligenciado al inicio del tratamiento, donde se manifestó al paciente si está de acuerdo que sus datos sean empleados en posteriores investigaciones por parte del Hospital, sin embargo, el uso de los datos que se extrajeron se realizó de forma anónima (confidencialidad).

6.8 CONFLICTOS DE INTERÉS

El investigador principal da a conocer que realizó su residencia hospitalaria dentro de la institución en la cual se llevó a cabo la investigación y el segundo investigador se encuentra vinculado como colaborador activo del Hospital Universitario del Valle.



7 RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados, análisis y discusión de los datos obtenidos en la implementación de la planeación de cáncer de próstata mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización multicriterio. A continuación, se realiza una descripción de cada una de las variables independientes definidas anteriormente en la Tabla 14, tanto para el apartado de la información demográfica como para el análisis de índices o criterios de calidad de planeación.

Las variables demográficas se establecieron en aras de describir las características de los pacientes que se tratan en el hospital, por ejemplo, la variable edad nos da una noción de la edad promedio de los pacientes que reciben tratamiento de radioterapia, mientras que la clasificación de los pacientes por estadios y por dosis de tratamiento nos permite tener conocimiento del porcentaje de pacientes que presentan cáncer en sus diferentes etapas, con esta información se pueden buscar estrategias para la prevención de dicha enfermedad y centrar el nicho de atención en esa población. Mientras que el volumen de las estructuras es relevante tanto para el entrenamiento del modelo como para determinar si se debe mejorar en la preparación de los pacientes en la simulación y por consiguiente en la administración del tratamiento.

Por otro lado, las variables de calidad de planeación ayudan a determinar la calidad de los planes de tratamiento, puesto que, se busca determinar que tan buenos son los planes, para esto se define un puntaje global, con el que posteriormente se logra asignar una calificación a estos mismos. Adicionalmente, es importante determinar la homogeneidad de la dosis y la capacidad de las curvas de isodosis de conformar bien el volumen del tumor, mientras se reduce la dosis a los OAR's. El porcentaje de diferencia de los planes de tratamiento se puede evidenciar con el uso del índice gama, ya que, se observa si el haz se modula de forma distinta en cada uno de los planes en cuestión.

7.1 DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DEMOGRÁFICAS

De acuerdo con el período establecido para el estudio descriptivo de cohorte retrospectivo (01 de enero de 2020 a 30 de junio de 2023) se determinó una muestra de 170 registros de planes de tratamiento, de los cuales se extrae la información necesaria para realizar el respectivo análisis. Se tiene una media de 68 DE[7] años, dicha edad se define considerando la fecha de nacimiento y el día de inicio de tratamiento (día de la primera sesión de radioterapia). La edad mínima fue de 49 años y la máxima de 85 años, como se puede observar en la Figura 14, se realizó un gráfico de frecuencias (histograma) distribuido en quinquenios.

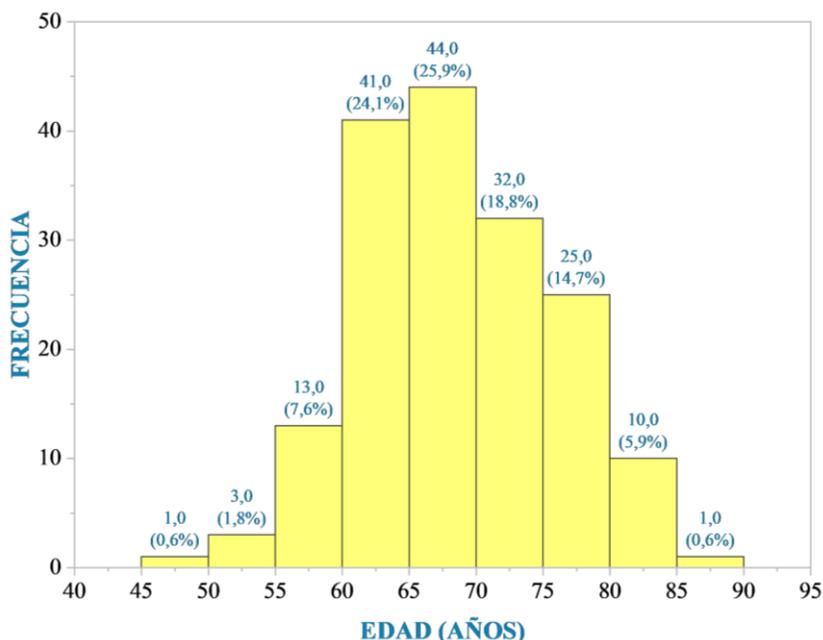


Figura 14.. Histograma de la edad de los registros de pacientes distribuida por quinquenios.

Seguidamente, para la descripción de la clasificación de los registros de pacientes por estadificación se tiene un 30.0%, 34.7% y 35.3% para bajo riesgo, riesgo intermedio y alto riesgo, respectivamente, como se puede observar en la Tabla 15, considerando el total de registros usados en el estudio como $N = 170$.

Tabla 15.. Condiciones demográficas por dosis de prescripción, estadificación y esquema de tratamiento, $N=170$.

Parámetros		Bajo riesgo		Riesgo intermedio		Alto riesgo		TOTAL			
		n	%	n	%	n	%	N	%	IC _{95%}	
Dosis de prescripción	6000 cGy	30	17.6%	48	28.2%			78	45.9%	38.4%	53.4%
	6750 cGy	17	10.0%			1	0.6%	18	10.6%	6.0%	15.2%
	7000 cGy	4	2.4%	11	6.5%	59	34.7%	74	43.5%	36.1%	51.0%
Total		51	30.0%	59	34.7%	60	35.3%	170	100.0%		
Esquema	Esquema 1					55	32.4%	55	32.4%	25.3%	39.4%
	Esquema 2			11	6.5%			11	6.5%	2.8%	10.2%
	Esquema 3			48	28.2%			48	28.2%	21.5%	35.0%
	Esquema 4	4	2.4%					4	2.4%	0.1%	4.6%
	Esquema 5	17	10.0%					17	10.0%	5.5%	14.5%
	Esquema 6	30	17.6%					30	17.6%	11.9%	23.4%
	Esquema 7					5	2.9%	5	2.9%	0.4%	5.5%
Total		51	30.0%	59	34.7%	60	35.3%	170	100.0%		

En la Tabla 15 se observa información relevante respecto a la dosis de prescripción donde el 43.5% ($IC_{95\%}: 36.1\% - 51.0\%$), 10.6% ($IC_{95\%}: 6.0\% - 15.2\%$) y 45.9% ($IC_{95\%}: 38.4\% - 53.4\%$) corresponden a las dosis de 7000 cGy, 6750 cGy y 6000 cGy respectivamente, adicionalmente se evidencia que las dosis de prescripción más frecuentemente usadas son las de 7000 cGy para estadio de alto riesgo (34.7%) y la de 6000 cGy para estadificación de riesgo intermedio (28.2%).

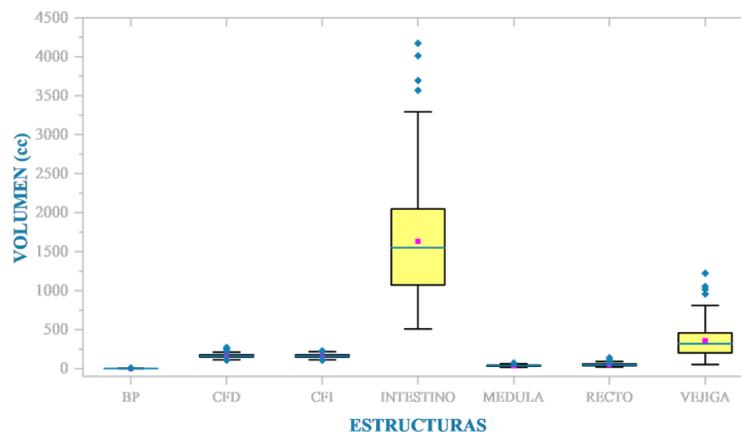


El tratamiento de cáncer de próstata de acuerdo con sus diferentes estadios puede abarcar varios esquemas de tratamiento, como son:

- Esquema 1: (7000, 6160, 5040) cGy
- Esquema 2: (7000, 6160) cGy
- Esquema 3: (6000, 5400) cGy
- Esquema 4: (7000) cGy
- Esquema 5: (6750) cGy
- Esquema 6: (6000) cGy
- Esquema 7: otro.

En la Tabla 15 se muestra el esquema de tratamiento usado para cada uno de los estadios, para bajo riesgo se tiene la aplicación de los esquemas 4, 5 y 6, para riesgo intermedio se usan los esquemas 2 y 3, mientras que para alto riesgo los esquemas que se aplican son el 1 y 7. De donde se puede observar que los esquemas aplicados con mayor frecuencia son: esquema 1 y a la vez con estadificación de alto riesgo hacen parte de esta categoría con 55 registros (32.4%, $IC_{95\%}$: 25.3% – 39.4%) y para el esquema 3 de riesgo intermedio con 48 registros de tratamiento (28.2%, $IC_{95\%}$: 21.5% – 35.0%), finalmente estas dos categorías representan el 60.6% de todos los datos.

Dentro de las variables demográficas se define el volumen contorneado de las estructuras que se encuentran en la región de la pelvis para los pacientes con diagnóstico de cáncer de próstata, entre los cuales se encuentran: bulbo peneano (BP), cabeza femoral derecha (CFD), cabeza femoral izquierda (CFI), intestino delgado (INT), médula, recto y vejiga. La información correspondiente a cada una de las estructuras se encuentra consignada gráficamente en la Figura 15.



Volumen de estructuras (cc)				
Estructura	Mediana	RIC	Mínimo	Máximo
BP	1.2	1.4	0.3	6.9
CFD	161.7	28.5	105.0	270.1
CFI	161.6	27.4	105.8	228.1
INTESTINO	1551.0	978.7	509.7	4172.2
MEDULA	36.8	14.0	17.3	70.4
RECTO	47.0	22.4	20.2	136.7
VEJIGA	319.6	255.2	54.2	1222.4

Figura 15.. Condiciones demográficas sobre el volumen de los OAR's



Para la interpretación del volumen de los targets se tienen las siguientes características: PTV1 se define a través de la media de $95.6 \text{ DE}[39.0] \text{ cm}^3$ con un valor mínimo del volumen de 34.3 cm^3 y un valor máximo de 246.5 cm^3 , para PTV2 se determina una media de $14.3 \text{ DE}[8.1] \text{ cm}^3$ con valor mínimo de 2.4 cm^3 y para un valor máximo de 46.6 cm^3 , mientras que para PTV3 tiene una media de $406.1 \text{ DE}[157.7] \text{ cm}^3$ con un valor de volumen mínimo y máximo de 123.8 cm^3 y 901.6 cm^3 respectivamente. La distribución de los datos se puede observar en la Figura 16.

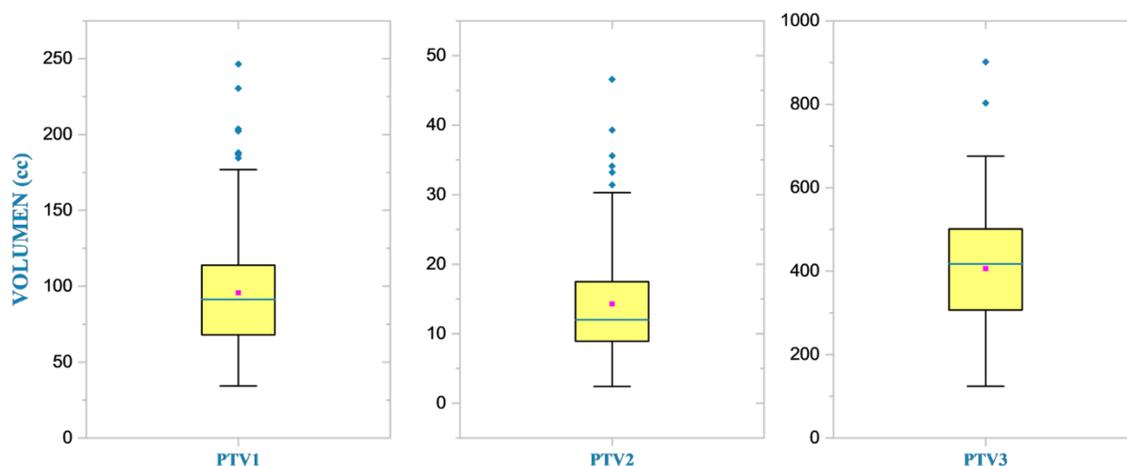


Figura 16.. Volumen de targets (PTV1, PTV2 y PTV3)

Adicionalmente se diferencia el volumen de los PTV's de acuerdo con la estadificación, la información correspondiente se encuentra en la Tabla 16, se puede observar que en el contorneado del PTV1 para riesgo intermedio hay mayor variabilidad ($RIC = 48.2 \text{ cc}$), mientras tanto el contorneado de esta estructura tiene menor variabilidad para bajo riesgo ($RIC = 39.8 \text{ cc}$), con respecto a PTV2 no hay una variabilidad muy significativa puesto que el rango intercuartílico de los datos para riesgo intermedio y alto riesgo difiere en 0.2 cc y la mediana es igual en ambos casos.

Tabla 16.. Volumen de targets clasificados de acuerdo con la estadificación

		Volumen de targets (cc)																
		PTV1					PTV2					PTV3						
Estadio	n	%	Med	RIC	Min	Max	n	%	Med	RIC	Min	Max	n	%	Med	RIC	Min	Max
BR	51	30.0%	95.5	39.8	35.9	246.5												
RI	59	34.7%	76.9	48.2	34.3	203.7	59	34.7%	12	9.4	2.7	39.3						
AR	60	35.3%	95.8	45.9	41.6	202.3	55	32.4%	12	9.2	2.4	46.6	60	35.3%	417.4	198.2	123.8	901.6
Total	170			100.0%			114			67.1%			60			35.3%		

Análisis y discusión

En el estudio se observa que la mayoría de los pacientes se encuentran distribuidos con mayor frecuencia entre los 55 a 85 años (entre el tercer y octavo quinquenio), representando al 97.0% del tamaño de la muestra y con menor frecuencia para edades menores a los 55 años (2.4%) y mayores a los 85 años (0.6%). Por lo tanto; los datos obtenidos respecto a la edad de los pacientes de la muestra confirman que la probabilidad de incidencia del cáncer



de próstata incrementa con la edad en concordancia con la información característica para esta enfermedad que se encuentra plasmada en la WORLD JOURNAL OF ONCOLOGY (Epidemiology of Prostate Cancer), en el cual la tasa de incidencia a nivel mundial está fuertemente relacionada con la edad (hombres mayores a 65 años) [69], adicionalmente en la Guía de práctica clínica para la detección temprana, diagnóstico, tratamiento, seguimiento y rehabilitación del cáncer de próstata del Sistema General de Seguridad Social en Salud-Colombia, muestra una mayor incidencia de la enfermedad en hombres mayores a 60 años, en el estudio la mayor incidencia se da para hombres con edad dentro del cuarto y quinto quinquenio con un 50.0% del total de los registros de tratamientos. [70]

Respecto a la dosis de prescripción se puede evidenciar que las más usadas en los tratamientos son de 7000 cGy (43.5%) y 6000 cGy (45.9%), además se observa una relación de la dosis de prescripción con la estadificación, de donde se tiene que: la prescripción de 7000 cGy mayormente es usada para estadios de alto riesgo con un 34.7% y la prescripción de 6000 cGy se usa frecuentemente para la estadificación de riesgo intermedio con un 28.2%.

Adicionalmente se hace el respectivo análisis de los esquemas de tratamiento usados en la institución los cuales van relacionados directamente con la estadificación, ya que, el esquema de tratamiento más recurrente es el Esquema 1 para estadificaciones de riesgo alto representando el 32.4% de los datos, seguido del Esquema 3 usado para estadio de riesgo intermedio con el 28.2% de los registros. Por consiguiente, se observa que existe una relación tanto de la dosis, estadificación y el esquema de tratamiento, ya que; los pacientes con estadificaciones de alto riesgo frecuentemente son tratados con dosis de 7000 cGy y con el esquema 1, mientras los pacientes de riesgo intermedio a menudo son tratados con dosis de 6000 cGy y haciendo uso del esquema 3.

En cuanto a la información sobre el volumen de las estructuras se evidencia que los pacientes en principio pueden poseer similitudes geométricas, sin embargo; hay diferencias en las características anatómicas de los pacientes que se pueden evidenciar (variabilidad en el contorneado) usualmente, en algunos registros se pueden ver marcadas esas diferencias al convertirse en datos atípicos mostrados en la estadística, considerando que el contorneado de las estructuras está directamente relacionado con el usuario que realice dicha actividad.

Para el bulbo peneano se puede observar que hay anatomías volumétricas algo dispersas, por lo tanto, se puede deducir que el contorneado de dicha estructura es variable y más notorio a comparación de los otros órganos, teniendo una dependencia relacionada tanto con la anatomía del paciente y la calidad de la imagen del CT como de las personas que realizan la actividad, por lo tanto, una discrepancia en la ejecución de la tarea puede conllevar a una sobre o subestimación del volumen, además se debe considerar que al tener ligeras desviaciones en el contorno de dicho órgano entre diferentes observadores conduce a cambios tanto en el volumen como en el DVH, debido al volumen relativamente pequeño de la estructura. El contorneado del órgano ha sido objeto de estudio considerando la variabilidad entre observadores como se muestra en la referencia [71] y esto corrobora los resultados obtenidos en esta sección.



Las cabezas femorales tienen una distribución de volumen más localizada a la media de los datos y prácticamente no difiere entre la cabeza femoral izquierda y derecha, además al observar los rangos intercuartílicos (cabeza femoral derecha: $RIC = 28.5 \text{ cc}$ y cabeza femoral izquierda: $RIC = 27.4 \text{ cc}$) de estas estructuras se evidencia que no hay una variabilidad muy pronunciada en el contorneado de dichas estructuras anatómicas, sin embargo; hay una brecha en la cual se pueden observar estructuras de volumen reducido o que sea mayor, uno de los factores que influye en las estructuras en cuestión es que se hayan contorneado cortes antes de la finalización del trocante menor o que se hayan extendido mucho más del límite establecido en el protocolo de contorneado (hasta el último corte caudal del trocante menor), siguiendo las recomendaciones de contorneado especificadas en la referencia [30].

Adicionalmente, para el recto y la vejiga también se pueden observar rangos intercuartílicos amplios (recto: $RIC = 22.4 \text{ cc}$ y vejiga: $RIC = 255.2 \text{ cc}$) en cuales se encuentran distribuidos los datos, para estas estructuras se debe considerar la preparación de los pacientes para la asistencia a la simulación y al tratamiento, considerando que algunos datos pueden estar influenciados por la distensión de los órganos, para el recto con la presencia de gases o materia fecal (los cuales se pueden observar con datos por encima de los 90 cm^3) y para la vejiga con el llenado de dicho órgano (registros con volumen mayor a 800 cm^3) o el vaciamiento de este mismo.

7.2 DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DE CALIDAD DE PLANEACIÓN

El desarrollo del análisis de calidad de planeación se realizó en dos secciones, una de las cuales está dirigida en describir los registros de planes de tratamiento que fueron usados para la verificación de los modelos de planeación constituidos por 140 registros, mientras la sección adicional se basa en el análisis de los registros usados en la validación del modelo final (30 registros).

7.2.1 Etapa de verificación

En este apartado se realizó una descripción de cada una de las variables de calidad de planeación de forma independiente, para observar el comportamiento de estas, principalmente se inicia con la evaluación de los constraints. Para la evaluación de los límites de tolerancia nos basamos en la Tabla 10, de acuerdo con la dosis de prescripción.

7.2.1.1 Evaluación de constraints

Para llevar a cabo la evaluación de los constraints se hace uso de la Tabla 10 dentro de la cual se asigna los respectivos códigos a cada uno de los límites establecidos, en esta se tienen dos listas de límites de tolerancia dependientes de la dosis de prescripción: 6750 cGy o



7000 cGy y dosis de prescripción de 6000 cGy. De aquí en adelante se va a hacer referencia a los constraints con su respectivo código.

Con el objetivo de observar el comportamiento de los constraints de acuerdo con cada uno de los planes, se realizó una normalización de los límites de tolerancia a la dosis de prescripción de 7000 cGy, la evaluación de estos mismos se puede ver evidenciada en la Tabla 17, en la primera columna se muestran las gráficas en las cuales se comparan los constraints para cada uno de los 3 planes de tratamiento.

A continuación, se realizó una razón entre los constraints, considerando como plan base el que fue administrado con anterioridad (denominador), con la finalidad de observar la variación entre los planes generados por los dos modelos respecto al inicial. Los datos menores a 1 se consideran que mejoran el constraint (en el caso de los órganos en riesgo significa que hay una reducción en la dosis que reciben estos o el porcentaje de volumen que recibe una determinada dosis es menor), mientras que los valores mayores a 1 son considerados como un detrimento de los límites de tolerancia en dosis y porcentaje de volumen para los tejidos aledaños al tumor (aumento de la dosis o del volumen que recibe cierta dosis). Los datos obtenidos se pueden observar gráficamente en la segunda columna de la Tabla 17.

Tabla 17.. Evaluación de los constraints, y evaluación de la razón entre los planes generados por los modelos (RP1 y RP2) y los planes originales (PI)

Est	Evaluación constraints (PI, RP1, RP2)	Razón (PI/PI, RP1/PI y RP2/PI)
BP: V4000 cGy ≤ 40.0% V4080 cGy ≤ 50.0%		
BP: V5000 cGy ≤ 20.0% V4860 cGy ≤ 25.0%		



Est	Evaluación constraints (PI, RP1, RP2)	Razón (PI/PI, RP1/PI y RP2/PI)
BP: $D_{mean} \leq 5200 \text{ cGy}$ $D_{max} \leq 5000 \text{ cGy}$		
CFD: $D_{max} \leq 6800 \text{ cGy}$		
CFD: $V_{4080 \text{ cGy}} \leq 50.0\%$		
CFD: $V_{5000 \text{ cGy}} \leq 10.0\%$		



Est	Evaluación constraints (PI, RP1, RP2)	Razón (PI/PI, RP1/PI y RP2/PI)
CFI: $D_{max} \leq 6800$ cGy		
CFI: $V4080$ cGy $\leq 50.0\%$		
CFI: $V5000$ cGy $\leq 10.0\%$		
INT: $D_{0,1cc} \leq 5000$ cGy		



Est	Evaluación constraints (PI, RP1, RP2)	Razón (PI/PI, RP1/PI y RP2/PI)
INT: $V_{4080} \text{ cGy} \leq 17.0 \text{ cc}$	<p>Box plot for constraint C11 [cc]. The y-axis ranges from 0 to 0. The x-axis categories are PI, RP1, and RP2. All three categories show a median value of 0, with very little spread.</p>	<p>Box plot for ratio C11. The y-axis ranges from 0 to 1. The x-axis categories are PI/PI, RP1/PI, and RP2/PI. All three categories show a median value of 1, with very little spread.</p>
MED: $D_{max} \leq 4500 \text{ cGy}$	<p>Box plot for constraint C12 [cGy]. The y-axis ranges from 0 to 5000. The x-axis categories are PI, RP1, and RP2. PI has a median around 400, RP1 around 400, and RP2 around 400. There is significant spread and outliers for all categories.</p>	<p>Box plot for ratio C12. The y-axis ranges from 0.0 to 3.0. The x-axis categories are PI/PI, RP1/PI, and RP2/PI. PI/PI has a median of 1.0. RP1/PI has a median around 0.9, and RP2/PI has a median around 0.9. There are many outliers for RP1/PI and RP2/PI.</p>
RECTO: $V_{7000} \text{ cGy} \leq 10.0 \text{ cc}$	<p>Box plot for constraint C13 [cc]. The y-axis ranges from 0 to 5. The x-axis categories are PI, RP1, and RP2. PI has a median around 0.8, RP1 around 1.0, and RP2 around 1.0. There are outliers for all categories.</p>	<p>Box plot for ratio C13. The y-axis ranges from 0 to 5. The x-axis categories are PI/PI, RP1/PI, and RP2/PI. PI/PI has a median of 1.0. RP1/PI has a median around 1.0, and RP2/PI has a median around 1.0. There are outliers for all categories.</p>
RECTO: $V_{7000} \text{ cGy} \leq 10.0\%$ $V_{6000} \text{ cGy} \leq 3.0\%$	<p>Box plot for constraint C14 [%]. The y-axis ranges from 0 to 14. The x-axis categories are PI, RP1, and C14_RP2. PI has a median around 2.5, RP1 around 2.5, and C14_RP2 around 3.5. There are outliers for all categories.</p>	<p>Box plot for ratio C14. The y-axis ranges from 0 to 14. The x-axis categories are PI/PI, RP1/PI, and RP2/PI. PI/PI has a median of 1.0. RP1/PI has a median around 1.0, and RP2/PI has a median around 1.0. There are outliers for all categories.</p>



Est	Evaluación constraints (PI, RP1, RP2)	Razón (PI/PI, RP1/PI y RP2/PI)
RECTO: V6500 cGy ≤ 22.0% V5700 cGy ≤ 15.0%		
RECTO: V4000 cGy ≤ 52.0% V5280 cGy ≤ 30.0%		
RECTO: V4860 cGy ≤ 50.0%		
RECTO: V4080 cGy ≤ 60.0%		



Est	Evaluación constraints (PI, RP1, RP2)	Razón (PI/PI, RP1/PI y RP2/PI)
VEJIGA: $V6500 \text{ cGy} \leq 10.0\%$ $V6000 \text{ cGy} \leq 5.0\%$		
VEJIGA: $D_{50\%} \leq 5000 \text{ cGy}$		
VEJIGA: $V4860 \text{ cGy} \leq 25.0\%$		
VEJIGA: $V4080 \text{ cGy} \leq 50.0\%$		

De acuerdo con la información plasmada en las gráficas de la Tabla 17, se observa una reducción tanto en la media como en la variabilidad de los datos para C3, siendo más notoria para el modelo 2 (representando una disminución del 40.2% respecto al criterio



original). Para las cabezas femorales se evidencia una reducción en la media y el RIC para C4 y C7, tanto en el modelo 1 como en el 2, para el modelo 1 la disminución de C4 es de 10.3% y C7 en 12.6%, sin embargo, con el modelo 2 la variabilidad disminuye notoriamente para C4 en 27.0% y para C7 en 29.1%. Mientras para C10 se puede observar que no hay una diferencia muy notoria entre los planes, disminución del 13.4% para el modelo 1 y del 14.2% para el modelo 2, por lo tanto; los modelos lograron reproducir los valores originales del criterio en cuestión. C12 muestra una reducción en la media en menor proporción para el modelo 1 (5.8%) y con el modelo 2 fue de 13.7%, adicionalmente para C13 se tiene un detrimento en la media para ambos modelos (modelo 1: 7.3% y modelo 2: 10.0%), C14 aumento la media para el modelo 1 en 22.8% y para el modelo 2 en 12.8%, para C15 el modelo 1 empeoró el criterio en 0.7%, el segundo modelo disminuyó la media en 5.8% y se mantiene la variabilidad de los datos, para C16 se tiene una disminución de la media en 14.4% y el RIC para el modelo 2, con C17 se aprecia una reducción de la media para el modelo 2 en 11.1%, con respecto a C18 se tiene una disminución de la media para el modelo 2 en 13.6%, para C19 hay reducción en la media en ambos modelos en aproximadamente el 6.0%, por tanto; se reproducen los valores de los planes originales (media y RIC similares en los 3 casos), C20 tiene disminución de la media del 13.1% con el modelo 1 y 15.7% para el modelo 2, para C21 hay reducción en la media (modelo 1: 10.5% y modelo 2: 13.3%), por último respecto a C22 se evidencia disminución de la media para ambos modelos (modelo 1 en 12.7% y modelo 2 en 15.2%).

Seguidamente, se determina la cantidad de constraints que reproducen los datos de los planes iniciales estos son categorizados como IGUAL, los planes que mejoran el constraint toman la descripción de MEJORA y los registros que lo empeoran se clasificaron como NO MEJORA, esta clasificación se realizó para los planes generados con los modelos respecto a los planes originales (razón), como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18.. Categorización de la razón entre planes, como (igual, mejora y no mejora)

PARÁMETROS			RP1/PI						RP2/PI							
ESTRUCTURA	CONSTRAINT	n	IGUAL	%	MEJORA	%	NO MEJORA	%	TOTAL	IGUAL	%	MEJORA	%	NO MEJORA	%	TOTAL
BP	C1	140	123	87.9%	16	11.4%	0	0.0%	99.3%	124	88.6%	16	11.4%	0	0.0%	100.0%
	C2	140	130	92.9%	9	6.4%	0	0.0%	99.3%	131	93.6%	9	6.4%	0	0.0%	100.0%
	C3	140	0	0.0%	137	97.9%	3	2.1%	100.0%	0	0.0%	140	100.0%	0	0.0%	100.0%
CFD	C4	74	0	0.0%	61	82.4%	13	17.6%	100.0%	0	0.0%	72	97.3%	2	2.7%	100.0%
	C5	66	66	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	100.0%	66	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	100.0%
	C6	140	138	98.6%	2	1.4%	0	0.0%	100.0%	138	98.6%	2	1.4%	0	0.0%	100.0%
CFI	C7	74	0	0.0%	65	87.8%	9	12.2%	100.0%	0	0.0%	73	98.6%	1	1.4%	100.0%
	C8	66	0	0.0%	66	100.0%	0	0.0%	100.0%	66	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	100.0%
	C9	140	135	96.4%	5	3.6%	0	0.0%	100.0%	135	96.4%	5	3.6%	0	0.0%	100.0%
INT	C10	74	0	0.0%	63	85.1%	11	14.9%	100.0%	0	0.0%	62	83.8%	12	16.2%	100.0%
	C11	66	0	0.0%	66	100.0%	0	0.0%	100.0%	66	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	100.0%
MED	C12	140	0	0.0%	113	80.7%	27	19.3%	100.0%	1	0.7%	121	86.4%	18	12.9%	100.0%
RECTO	C13	74	24	32.4%	22	29.7%	26	35.1%	97.3%	23	31.1%	24	32.4%	26	35.1%	98.6%
	C14	140	20	14.3%	57	40.7%	61	43.6%	98.6%	30	21.4%	51	36.4%	57	40.7%	98.6%
	C15	140	5	3.6%	74	52.9%	61	43.6%	100.0%	6	4.3%	85	60.7%	49	35.0%	100.0%
	C16	140	1	0.7%	82	58.6%	57	40.7%	100.0%	0	0.0%	104	74.3%	36	25.7%	100.0%
	C17	66	1	1.5%	38	57.6%	27	40.9%	100.0%	2	3.0%	48	72.7%	16	24.2%	100.0%
	C18	66	1	1.5%	44	66.7%	21	31.8%	100.0%	0	0.0%	54	81.8%	12	18.2%	100.0%
VEJIGA	C19	140	18	12.9%	88	62.9%	34	24.3%	100.0%	17	12.1%	89	63.6%	34	24.3%	100.0%
	C20	74	0	0.0%	55	74.3%	19	25.7%	100.0%	0	0.0%	60	81.1%	14	18.9%	100.0%
	C21	66	5	7.6%	51	77.3%	10	15.2%	100.0%	6	9.1%	56	84.8%	4	6.1%	100.0%
	C22	66	3	4.5%	56	84.8%	7	10.6%	100.0%	2	3.0%	59	89.4%	5	7.6%	100.0%



Tabla 19.. Evaluación de la razón entre los modelos respecto al plan inicial (RP1/PI Y RP2/PI), clasificados por estadio

PARÁMETROS			RP1				RP2					
ESTRUCTURA	ESTADIO	CONSTRAINT	MEDIA	DE	MIN	MAX	MEDIA	DE	MIN	MAX		
BP	BR	C1 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	
			RI	0.8	0.4	0.0	1.0	0.8	0.4	0.0	1.0	
			AR	0.8	0.4	0.0	1.0	0.8	0.4	0.0	1.0	
	BR	C2 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	
			RI	1.0	0.2	0.0	1.0	1.0	0.2	0.0	1.0	
			AR	0.9	0.3	0.0	1.0	0.9	0.3	0.0	1.0	
	BR	C3 (cGy)	0.6	0.1	0.3	1.0	0.6	0.2	0.3	0.9	0.9	
			RI	0.7	0.2	0.3	1.2	0.5	0.2	0.3	0.9	
			AR	0.7	0.2	0.2	1.1	0.7	0.2	0.2	1.0	
CFD	BR	C4 (cGy)	1.0	0.1	0.7	1.1	0.8	0.1	0.6	1.0	1.0	
			RI	0.8	0.1	0.7	0.9	0.7	0.1	0.5	0.8	0.8
			AR	0.9	0.1	0.7	1.3	0.9	0.1	0.7	1.3	1.3
	BR	C5 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	
			RI	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
			AR	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
	BR	C6 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	
			RI	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
			AR	1.0	0.2	0.0	1.0	1.0	0.2	0.0	1.0	1.0
CFI	BR	C7 (cGy)	0.9	0.1	0.7	1.1	0.8	0.1	0.6	1.0	1.0	
			RI	0.8	0.1	0.7	1.0	0.7	0.1	0.6	0.8	0.8
			AR	0.9	0.1	0.7	1.1	0.7	0.1	0.5	0.9	0.9
	BR	C8 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	
			RI	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
			AR	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
	BR	C9 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	
			RI	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
			AR	0.9	0.3	0.0	1.0	0.9	0.3	0.0	1.0	1.0
INT	BR	C10 (cGy)	0.8	0.2	0.6	1.2	0.8	0.2	0.6	1.2	1.2	
			RI	0.8	0.1	0.6	0.9	0.7	0.1	0.6	0.9	0.9
			AR	0.9	0.2	0.3	1.1	0.9	0.2	0.4	1.1	1.1
	BR	C11 (cc)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	
			RI	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
			AR	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
MÉDULA	BR	C12 (cGy)	1.0	0.1	0.8	1.4	0.9	0.1	0.7	1.4	1.4	
			RI	0.9	0.1	0.7	1.1	0.9	0.1	0.7	1.1	1.1
			AR	0.9	0.4	0.5	2.7	0.7	0.2	0.4	1.3	1.3
RECTO	BR	C13 (cc)	0.9	0.4	0.0	1.7	1.0	0.5	0.0	2.3	2.3	
			RI	1.0	0.2	0.7	1.4	1.0	0.2	0.7	1.3	1.3
			AR	1.1	0.6	0.5	4.6	1.2	0.6	0.5	5.0	5.0
	BR	C14 (%)	1.0	0.3	0.0	1.7	1.0	0.4	0.0	2.3	2.3	
			RI	1.2	1.1	0.3	7.0	1.2	1.2	0.3	7.3	7.3
			AR	1.4	2.1	0.4	15.0	1.1	0.7	0.0	5.3	5.3
	BR	C15 (%)	1.1	0.4	0.6	3.0	1.0	0.3	0.5	2.0	2.0	
			RI	1.0	0.2	0.6	1.4	0.9	0.2	0.5	1.5	1.5
			AR	1.0	0.2	0.6	1.7	0.9	0.2	0.5	1.6	1.6
	BR	C16 (%)	1.0	0.2	0.6	1.6	0.9	0.2	0.6	1.4	1.4	
			RI	1.0	0.2	0.5	1.5	0.9	0.2	0.5	1.4	1.4
			AR	0.9	0.3	0.4	1.9	0.8	0.2	0.4	1.2	1.2
	BR	C17 (%)	1.0	0.2	0.6	1.4	0.9	0.2	0.6	1.2	1.2	
			RI	1.0	0.3	0.5	2.0	0.9	0.2	0.5	1.5	1.5
			AR	1.0	0.2	0.6	1.3	0.9	0.2	0.6	1.2	1.2
	BR	C18 (%)	1.0	0.3	0.6	2.1	0.9	0.3	0.5	1.8	1.8	
			RI	1.0	0.3	0.6	2.1	0.9	0.3	0.5	1.8	1.8
			AR	1.0	0.3	0.6	2.1	0.9	0.3	0.5	1.8	1.8
VEJIGA	BR	C19 (%)	1.0	0.2	0.1	1.5	1.0	0.2	0.1	1.3	1.3	
			RI	1.0	0.2	0.5	2.0	0.9	0.2	0.5	2.0	2.0
			AR	0.9	0.1	0.4	1.1	0.9	0.1	0.5	1.2	1.2
	BR	C20 (cGy)	0.8	0.2	0.5	1.1	0.7	0.2	0.5	1.1	1.1	
			RI	0.6	0.2	0.4	0.9	0.6	0.2	0.3	0.9	0.9
			AR	0.9	0.2	0.4	1.4	0.9	0.2	0.4	1.3	1.3
	BR	C21 (%)	0.9	0.2	0.3	1.1	0.9	0.2	0.3	1.1	1.1	
			RI	0.9	0.1	0.6	1.1	0.9	0.1	0.6	1.1	1.1
			AR	0.9	0.2	0.3	1.0	0.8	0.2	0.3	1.1	1.1
	BR	C22 (%)	0.9	0.1	0.6	1.1	0.9	0.1	0.6	1.1	1.1	
			RI	0.9	0.1	0.6	1.1	0.9	0.1	0.6	1.1	1.1
			AR	0.9	0.1	0.6	1.1	0.9	0.1	0.6	1.1	1.1



A continuación, se realiza el análisis de la razón entre los constraints considerando la estadificación, los datos se muestran en la Tabla 19. Inicialmente se puede evidenciar que para el bulbo peneano hay disminución de los tres constraints, para C1 en la misma medida para riesgo intermedio y alto riesgo (20.0%), mientras C3 disminuye en un 40.0% para pacientes de bajo riesgo en ambos modelos, la cabeza femoral derecha presenta mejorías en C4 de forma más notoria con el modelo 2, la reducción del constraint para bajo riesgo, riesgo intermedio y alto riesgo fue de 20.0%, 30.0% y 10.0% respectivamente, la cabeza femoral izquierda toma los mismos valores que la lateralidad derecha pero difiere para alto riesgo, ya que, presenta una mejoría del 30.0%. Mientras que el intestino delgado presenta mejorías en C10 del 20.0%, 30.0% y 10.0% para bajo riesgo, riesgo intermedio y alto riesgo correspondientemente, respecto al recto se puede observar que con el modelo 2 hay un incremento del 20.0% en C13 en comparación con el plan inicial, mientras que con el modelo 1 es del 10.0%, para C14 los planes de bajo riesgo y alto riesgo tienen un detrimento del 20.0% y 10.0% respectivamente, mientras C15, C16, C17 y C18 para el modelo uno reproducen los valores iniciales, el modelo 2 logra reducir los límites en aproximadamente el 10.0% para los 3 estadios. La vejiga presenta una reducción más notoria en C20 de 30.0% y 40.0% para bajo riesgo y riesgo intermedio, mientras que los constraints restantes mejoran en un 10.0%.

Análisis y discusión.

En la Tabla 18 se puede observar la cantidad de planes que logran reproducir los criterios del plan original, además de la cantidad de planes que mejoran los criterios y los que lo empeoran. De la cual se puede destacar que las métricas que logran reproducir los valores del plan inicial frecuentemente para el bulbo peneano son C1 ($V4000 \text{ cGy} \leq 40.0\%$ y $V5000 \text{ cGy} \leq 20.0\%$) y C2 ($V4080 \text{ cGy} \leq 50.0\%$ y $V4860 \text{ cGy} \leq 25.0\%$) en aproximadamente el 90.0%, revisando los registros de los planes se observa que entregaron resultados de 0.0%, indicando que para pacientes que tengan contorneado el bulbo peneano sin que haya solapamiento con el PTV van a recibir dosis inferiores a las métricas evaluadas, mientras el 10.0% restante constituyen los planes de tratamiento que poseen intersección volumétrica entre el órgano y el PTV. Con respecto a las cabezas femorales C5 ($V4080 \text{ cGy} \leq 50.0\%$), C6 ($V5000 \text{ cGy} \leq 10.0\%$), C8 ($V4080 \text{ cGy} \leq 50.0\%$) y C9 ($V5000 \text{ cGy} \leq 10.0\%$) la replicación de los valores es más del 95.0%, observando el comportamiento de la isodosis del 50% se puede evidenciar que excluye en su totalidad la cobertura sobre las cabezas femorales, por lo tanto; la dosis que reciben es inferior a isodosis del 50%. Para C11 ($V4080 \text{ cGy} \leq 17.0 \text{ cc}$) relaciona el intestino delgado para este se reproducen el 100.0% de los datos, esta métrica se usa en la evaluación de la dosis de prescripción de 6000 cGy, de acuerdo con los datos obtenidos se encuentra que los registros corresponden a estadios de bajo riesgo y riesgo intermedio, los cuales abarcan la próstata y las vesículas seminales, por lo tanto; es poco probable que el intestino reciba dosis superiores al 50%, por tanto; los resultados de la evaluación de las métricas son de 0.0%, mientras que para el C13 ($V7000 \text{ cGy} \leq 10.0 \text{ cc}$), C14 ($V7000 \text{ cGy} \leq 10.0\%$ y $V6000 \text{ cGy} \leq 3.0\%$) y C19 ($V6500 \text{ cGy} \leq 10.0\%$ y $V6000 \text{ cGy} \leq 5.0\%$) la coincidencia entre valores va



disminuyendo, puesto que, estos evalúan el comportamiento del recto y la vejiga a altas dosis, como se puede visualizar las métricas evalúan el comportamiento de los órganos con las dosis de prescripción al PTV, para algunos registros se observa que el recto posee dilataciones ya sea por gases o por materia fecal, además por la proximidad existente entre el PTV y el órgano se puede observar que el modelo busca entregar dosis altas y homogéneas, por esto, logra abarcar un porcentaje de volumen superior a los límites establecidos, adicionalmente al reducir la dosis en la cabezas femorales esta misma se concentra en el objetivo y la caída de dosis no se realiza de forma abrupta.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este apartado se puede resaltar que los planes generados con el modelo basado en el conocimiento mejoran la mayoría de los constraints establecidos (86.4% para modelo 1 y 90.9% para el modelo 2), el órgano que con mayor frecuencia tiene mayor probabilidad de detrimento es el recto (C13 y C14), los datos que conforman el aumento usualmente son los pacientes con estadificación de alto riesgo. Los resultados reproducen datos acordes con la bibliografía [72], en el artículo muestran que los planes generados con los modelos presentan dosis comparables o mejores que los planes clínicos manuales para: vejiga, recto, bulbo peneano y cabezas femorales. Además, resalta que los planes que usan las prioridades automatizadas para el proceso de automatización no pueden controlar de forma muy eficiente la dosis rectal.

Análisis multivariado

Luego de evaluar la razón entre los planes generados con los modelos respecto a los planes originales se prosigue a determinar si los planes generados con el segundo modelo mejoran los constraints respecto al modelo 1, para ello se realiza un análisis de odds ratio (OR), con la finalidad de representar el riesgo (probabilidad) de ocurrencia del suceso, los datos fueron consignados en la Tabla 20. La interpretación de los valores de OR es: $OR = 1$ no se evidencia asociación, $OR > 1$ y $IC \neq 1$ representa factor de riesgo caso contrario el tipo de asociación es no significativa y $OR < 1$ y $IC \neq 1$ indica factor de protección caso contrario se tiene asociación no significativa.]98_

Los planes generados con el modelo 2 presentan una probabilidad de 7.7 ($IC_{95\%}: 1.7 - 35.3$) veces mayor de mejorar el constraint C4 en comparación con los planes generados mediante el modelo 1. Asimismo, los planes provenientes del segundo modelo exhiben una probabilidad 10.1 ($IC_{95\%}: 1.2 - 82.0$) veces superior de mejorar el constraint C7 en relación con los planes generados por el modelo 1. En cuanto a C16, se observa que los planes generados con el modelo 2 tienen una probabilidad 2.0 ($IC_{95\%}: 1.2 - 3.4$) veces mayor de mejorarlo en comparación con los planes generados por el modelo 1.

En la Tabla 20 se puede observar que no se realiza el análisis para las métricas de C3, C5, C8 y C11, considerando que estos presentan mejoría en la totalidad de los registros como se puede corroborar en la Tabla 19. Finalmente, los constraints restantes no tienen una significancia suficiente, considerando que la cantidad de planes que mejoran un criterio son similares para ambos planes de tratamiento de los modelos, por tanto; no se logra determinar cuál de los dos modelos es mejor para esas métricas en específico.



Tabla 20.. Evaluación de ODDS RATIO, ¿el modelo 2 mejora los constraints respecto al modelo1?

CONSTRAINT	PLAN		¿MEJORA EL CONSTRAINT?			ODDS RATIO	IC _{95%}		TIPO DE ASOCIACIÓN
			SI	NO	TOTAL		INF	SUP	
C1	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	16	124	140	1.0	0.5	2.1	NO ASOCIADO
			11.4%	88.6%	100.0%				
		RP1	16	123	139				
			11.4%	87.9%	99.3%				
C2	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	9	131	140	1.0	0.4	2.6	NO ASOCIADO
			6.4%	93.6%	100.0%				
		RP1	9	130	139				
			6.4%	92.9%	99.3%				
C4	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	72	2	74	7.7	1.7	35.3	FACTOR DE RIESGO
			51.4%	1.4%	52.9%				
		RP1	61	13	74				
			43.6%	9.3%	52.9%				
C6	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	2	138	140	1.0	0.1	7.2	NO ASOCIADO
			1.4%	98.6%	100.0%				
		RP1	2	138	140				
			1.4%	98.6%	100.0%				
C7	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	73	1	74	10.1	1.2	82.0	FACTOR DE RIESGO
			52.1%	0.7%	52.9%				
		RP1	65	9	74				
			46.4%	6.4%	52.9%				
C9	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	5	135	140	1.0	0.3	3.5	NO ASOCIADO
			3.6%	96.4%	100.0%				
		RP1	5	135	140				
			3.6%	96.4%	100.0%				
C10	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	62	12	74	0.9	0.4	2.2	NO SIGNIFICATIVA
			44.3%	8.6%	52.9%				
		RP1	63	11	74				
			45.0%	7.9%	52.9%				
C12	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	121	19	140	1.5	0.8	2.9	NO SIGNIFICATIVA
			86.4%	13.6%	100.0%				
		RP1	113	27	140				
			80.7%	19.3%	100.0%				
C13	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	24	49	73	1.1	0.6	2.2	NO SIGNIFICATIVA
			17.1%	35.0%	52.1%				
		RP1	22	50	72				
			15.7%	35.7%	51.4%				
C14	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	51	87	138	0.8	0.5	1.4	NO SIGNIFICATIVA
			36.4%	62.1%	98.6%				
		RP1	57	81	138				
			40.7%	57.9%	98.6%				
C15	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	85	55	140	1.4	0.9	2.2	NO SIGNIFICATIVA
			60.7%	39.3%	100.0%				
		RP1	74	66	140				
			52.9%	47.1%	100.0%				
C16	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	104	36	140	2.0	1.2	3.4	FACTOR DE RIESGO
			74.3%	25.7%	100.0%				
		RP1	82	58	140				
			58.6%	41.4%	100.0%				
C17	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	48	18	66	2.0	0.9	4.1	NO SIGNIFICATIVA
			34.3%	12.9%	47.1%				
		RP1	38	28	66				
			27.1%	20.0%	47.1%				
C18	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	54	12	66	2.3	1.0	5.0	NO SIGNIFICATIVA
			38.6%	8.6%	47.1%				
		RP1	44	22	66				
			31.4%	15.7%	47.1%				
C19	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	89	51	140	1.0	0.6	1.7	NO ASOCIADO
			63.6%	36.4%	100.0%				
		RP1	88	52	140				
			62.9%	37.1%	100.0%				
C20	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	60	14	74	1.5	0.7	3.2	NO SIGNIFICATIVA
			42.9%	10.0%	52.9%				
		RP1	55	19	74				
			39.3%	13.6%	52.9%				
C21	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	56	10	66	1.6	0.7	4.0	NO SIGNIFICATIVA
			40.0%	7.1%	47.1%				
		RP1	51	15	66				
			36.4%	10.7%	47.1%				
C22	PLAN DE TRATAMIENTO	RP2	59	7	66	1.5	0.5	4.2	NO SIGNIFICATIVA
			42.1%	5.0%	47.1%				
		RP1	56	10	66				
			40.0%	7.1%	47.1%				



Para los constraints donde no se observa que hay una influencia significativa de mejoramiento de los criterios en relación con el modelo 2, se puede inferir que los dos modelos de planeación logran entregar resultados similares, no necesariamente iguales, logrando reproducir aproximadamente la misma cantidad de planes tanto para el modelo 1 como para el modelo 2. Mientras que los datos que se consideran como factor de riesgo tienen mayor cantidad de planes que mejoraron el constraint en evaluación.

Al revisar estos resultados, se puede inferir que probablemente puede haber una reducción de la morbilidad en los pacientes, puesto que, para el bulbo peneano el reducir la dosis que recibe este órgano disminuye la probabilidad de que el paciente pierda su funcionalidad eréctil, ya que, este representa un impacto significativo en la calidad de vida del paciente. La reducción de la dosis que reciben las cabezas femorales disminuye la probabilidad de que los pacientes presenten fracturas o colapso vertebral. El factor de riesgo más importante para el intestino delgado es la dosis, uno de los efectos es enteritis por radiación (daño del revestimiento del intestino, debido a que las células de la mucosa son muy radiosensibles), también se puede presentar obstrucción del intestino delgado, la perforación o la formación de fístulas. Las complicaciones a nivel rectal pueden manifestarse a través de diarrea, sangrado, engrosamiento de las paredes del recto (proctitis), entre los efectos tardíos pueden ser ulceraciones, fibrosis, fístulas, entre otros. Los cambios en la vejiga habitualmente suelen presentarse con mayor probabilidad a dosis elevadas, dentro de los cuales se puede encontrar la inflamación de paredes vesicales denominada cistitis radical aguda y en menor frecuencia se puede generar la perforación o fistulización, estos efectos secundarios son descritos por la Sociedad Española de Radiología Médica [73]. Al reducir la dosis que reciben los órganos ubicados en la pelvis se reduciría la probabilidad de ocurrencia de estas complicaciones.

7.2.1.2 *Cumplimiento de constraints*

En el estudio se define la tabla de constraints (Tabla 10), los cuales se usan de acuerdo con la dosis de prescripción, en este apartado se muestra una revisión de dichos parámetros, de acuerdo con los límites de tolerancia, donde el cumplimiento de la restricción es representado como un SI dentro de la tabla, una violación del valor establecido como aceptable se toma como no cumplimiento y se le asigna un NO. El análisis se llevó a cabo tanto por estadificación como por dosis de prescripción, como se puede observar en las tablas (Tabla 21 y Tabla 22), adicionalmente, se resaltaron los casos relevantes en color verde.

Respecto al cumplimiento o no cumplimiento de los constraints para los planes de verificación ($N = 140$), clasificados por estadios, para bajo riesgo, se observa que para C14 no hay cumplimiento de 13 registros en los 3 planes (representando el 9.3%), mientras que para los planes iniciales 1 registro se clasifica en la categoría de no cumplimiento de C15, para el modelo 1 no cumplen 3 registros con el criterio establecido y con modelo 2 no hay cumplimiento de 2 registros, por otro lado, C16 cuenta con 1 registro que se clasifica como no cumplimiento del constraint en los planes generados con los modelos, además 9 planes no cumplen con C19 para los tres planes de tratamiento, finalmente para C21 uno de los registros no satisface el criterio en los tres planes. Con respecto a los pacientes clasificados en la



categoría de riesgo intermedio, se observa que un dato no cumple con C1 y C2 en el plan inicial, 7 planes no cumplen con C14 para el plan inicial, 11 con el modelo 1 y 12 con el modelo 2, 1 registro no satisface el criterio C15 para los planes generados con los modelos, mientras que para C19 con el plan inicial no hay cumplimiento del criterio por 9 registros, 11 con el modelo 1 y 10 con el modelo 2. Para alto riesgo, 2 registros no cumplen con C1, C2 y C3 para el plan inicial, mientras que para C10 para los planes iniciales 28 registros se clasifican como no cumplimiento y 30 registros no se cumplen con los modelos, los modelos generan un plan que no satisface con C14, para C16 8 registros de los planes iniciales no cumplen el constraint, mientras que en los modelos 1 registro no satisface este mismo, no hay cumplimiento de C19 con 6 y 5 registros para plan inicial y los generados por los modelos respectivamente.

En la Tabla 22 se puede evidenciar el análisis por dosis, iniciando con 6000 cGy, para los planes iniciales 2 registros no satisfacen C3 para el plan inicial y 1 registro incumple el criterio para el modelo 2, no hay cumplimiento de C14 con 20 registros del plan inicial, 24 del modelo 1 y 25 del modelo 2, no hay satisfacción de C15 de 1 dato del plan inicial, 4 del modelo 1 y 3 del modelo 2, además del no cumplimiento de C19 por 14, 16 y 15 registros para el plan inicial, modelo 1 y modelo 2 respectivamente. Para la dosis de 6750 cGy, 1 registro no satisface C16 en la evaluación de los modelos y no hay cumplimiento de C19 para 3 registros en los 3 planes. Finalmente, para la dosis de 7000 cGy, 2 registros no cumplen con C1, C2 y C3 para el plan inicial, 28 registros no cumplen con C10 para el plan inicial y 30 registros por parte de los modelos, no hay cumplimiento de C14 por 1 registro en los dos planes generados por los modelos, no se satisface C19 con 7 registros del plan inicial y 6 con los modelos.

Análisis y discusión

Luego de determinar el cumplimiento de los constraints para cada uno de los pacientes se hace el respectivo estudio de acuerdo con la dosis de prescripción y a la vez por estadificación.

El registro de no cumplimiento de C16 para los modelos se trata de un paciente con tratamiento de lecho quirúrgico, el plan original logra reducir el porcentaje de volumen expuesto al haz, modulando a este mismo para proteger al recto, pero sacrificando las cabezas femorales, mientras los planes generados con los modelos modulan las mutiláminas para proteger tanto las cabezas femorales como el recto, sin embargo; la curva de isodosis de 4000 cGy logra abarcar más porcentaje de volumen, superando el valor de tolerancia establecido.

Para los planes de riesgo intermedio, un registro no satisface con C1 para el plan inicial y el generado con el modelo 1, se puede observar que hay intersección entre el PTV1 y el bulbo peneano, por tanto; la curva de isodosis del 95% logra cubrir en su totalidad los cortes en solapamiento, mientras que el modelo 2 logra modular el haz para enfriar la región de intersección, conllevando a la reducción de volumen cubierto por la curva de isodosis de 4080 cGy. Este mismo registro no satisface C2 y C3. Respecto a C14 para el modelo 2 un



registro que inicialmente cumplía con el constraint con ese deja de satisfacer el límite permitido, en la revisión se puede observar que el haz busca reducir la dosis entregada a las cabezas femorales, generando que la entrada del haz sea algo más intensa por el recto.

Mientras en los planes de alto riesgo, se observa que 2 registros no cumplen con C1, C2 y C3, en el plan original, pero con los modelos logra cumplirlos, los planes tienen las características de que hay solapamiento entre el target y el órgano, con el plan inicial se cubre con la isodosis del 100% el volumen comprometido, mientras con los modelos se logra modular el haz para reducir la dosis y el porcentaje de volumen del órgano.

En consideración con los planes que no satisfacen C10, se puede observar que la isodosis de 5000 cGy logra abarcar mayor volumen con los modelos que con los planes originales, considerando que los modelos buscan entregar una dosis de forma más localizada y a la vez lo más homogénea posible, en el modelo original el volumen en solapamiento no recibe dosis de 5000 cGy (región fría) mientras que con los modelos sí.

Un registro no cumple con C14 para los planes iniciales, mientras con los planes generados con los modelos logra satisfacer el límite permisible, se evidencia que la dosis de 7000 cGy logra excluir el volumen en solapamiento con el PTV1, mientras con los modelos se logra mayor conformidad y cubrimiento del PTV sacrificando el volumen que esta intersecado. Mientras que para C16 se tienen 7 registros que inicialmente no cumplen con el constraint pero que con el modelo 2 se alcanza el cumplimiento, los planes generados con los modelos logran modular el haz para cubrir el recto, se evidencia que la isodosis de 4000 cGy abarca menor volumen del órgano. Entre los registros en cuestión se tiene un paciente con distensión del recto y presencia de materia fecal, sin embargo; los modelos logran reducir la dosis que recibe el recto, estos modulan el haz para enfriar el órgano.

Finalmente, para la vejiga, se puede evidenciar para C19 que con el plan original se abarca mayor volumen del órgano, además se genera una región con un gradiente $> 100\%$ de la dosis de prescripción, mientras que con los modelos este volumen se reduce significativamente.

Los modelos basados en el conocimiento logran entregar planes de tratamiento de alta calidad, además, se puede observar que la caída del gradiente de dosis es más rápida en comparación con los planes originales, adicionalmente se debe recalcar que la reducción de la dosis que reciben los órganos a riesgo es más frecuente para dosis bajas, mientras que para dosis altas algunos registros sufren detrimento en los constraints. Como, por ejemplo, el detrimento de las métricas del recto se debe a que el modelo genera un DVH con una banda de predicción estrecha para las cabezas femorales, forzando al plan de tratamiento para que las múltilaminas protejan a estos órganos, pero por otra parte se tiene un sacrificio en el recto. Además, se debe resaltar que el modelo final fue alimentado con planes modificados con MCO, con esta herramienta se pueden buscar soluciones alternativas al plan base, siguiendo el fundamento que para mejorar un criterio puede sacrificar otro, por tanto, el reducir la dosis en las cabezas femorales puede deberse al detrimento del recto.



Tabla 21.. Evaluación de cumplimiento de cantidad de constraints clasificados por estadíos

PARÁMETROS	PI										RP1										RP2									
	BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}	
	n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup	n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup	n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup
C1	SI	41	29.3%	48	34.3%	48	34.3%	137	97.9%	95.5%	100.3%	41	29.3%	48	34.3%	50	35.7%	139	99.3%	97.9%	100.7%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	2	1.4%	3	2.1%	-0.3%	4.5%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1	0.7%	-0.7%	2.1%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
C2	SI	41	29.3%	48	34.3%	48	34.3%	137	97.9%	95.5%	100.3%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	2	1.4%	3	2.1%	-0.3%	4.5%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
C3	SI	41	29.3%	47	33.6%	48	34.3%	136	97.1%	94.4%	99.9%	41	29.3%	47	33.6%	50	35.7%	138	98.6%	96.6%	100.5%	41	29.3%	48	34.3%	50	35.7%	139	99.3%	97.9%
	NO	0	0.0%	2	1.4%	2	1.4%	4	2.9%	0.1%	5.6%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	2	1.4%	-0.5%	3.4%	0	0.0%	1	0.7%	1	0.7%	-0.7%	2.1%	
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
C4	SI	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	44.6%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	44.6%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	61.1%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%
	TOTAL	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	52.9%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	52.9%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	61.1%
C5	SI	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	55.4%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%
	TOTAL	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	47.1%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	47.1%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	55.4%
C6	SI	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
C7	SI	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	44.6%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	44.6%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	61.1%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%
	TOTAL	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	52.9%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	52.9%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	61.1%
C8	SI	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	55.4%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%
	TOTAL	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	47.1%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	47.1%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	55.4%
C9	SI	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%
C10	SI	16	11.4%	8	5.7%	22	15.7%	46	32.9%	25.1%	40.6%	16	11.4%	8	5.7%	20	14.3%	44	31.4%	23.7%	39.1%	16	11.4%	8	5.7%	20	14.3%	44	31.4%	39.1%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	28	20.0%	28	20.0%	13.4%	26.6%	0	0.0%	0	0.0%	30	21.4%	30	21.4%	14.6%	28.2%	0	0.0%	0	0.0%	30	21.4%	30	21.4%	28.2%
	TOTAL	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	52.9%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	52.9%	61.1%	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	61.1%
C11	SI	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	55.4%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%
	TOTAL	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	47.1%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	47.1%	55.4%	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	55.4%



PARÁMETROS	PI												RP1												RP2											
	BR			RI			AR			TOTAL			IC _{95%}			BR			RI			AR			TOTAL			IC _{95%}								
	n	%		n	%		n	%		N	%		%	Inf	Sup	n	%		n	%		n	%		N	%		%	Inf	Sup						
C12	SI	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%		
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%							41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%					41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%	
C13	SI	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	44.6%	61.1%				16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	44.6%	61.1%			16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%		
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%				0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%		
	TOTAL	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%						16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%					16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%		
C14	SI	28	20.0%	42	30.0%	50	35.7%	120	85.7%	79.9%	91.5%				29	20.7%	40	28.6%	49	35.0%	50	35.7%	118	84.3%	78.3%	90.3%			29	20.7%	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%
	NO	13	9.3%	7	5.0%	0	0.0%	20	14.3%	8.5%	20.1%				12	8.6%	9	6.4%	1	0.7%	22	15.7%	9.7%	21.7%			12	8.6%	8	5.7%	1	0.7%	21	15.0%		
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%						41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%					41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%		
C15	SI	40	28.6%	49	35.0%	50	35.7%	139	99.3%	97.9%	100.7%				40	28.6%	49	35.0%	50	35.7%	139	99.3%	97.9%	100.7%			40	28.6%	49	35.0%	50	35.7%	139	99.3%		
	NO	1	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	1	0.7%	-0.7%	2.1%				1	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	1	0.7%	-0.7%	2.1%			1	0.7%	0	0.0%	1	0.7%	-0.7%			
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%						41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%					41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%		
C16	SI	41	29.3%	49	35.0%	42	30.0%	132	94.3%	90.4%	98.1%				40	28.6%	49	35.0%	49	35.0%	49	35.0%	138	98.6%	96.6%	100.5%			40	28.6%	49	35.0%	49	35.0%	138	98.6%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	8	5.7%	8	5.7%	1.9%	9.6%				1	0.7%	0	0.0%	1	0.7%	2	1.4%	-0.5%	3.4%			1	0.7%	0	0.0%	2	1.4%	-0.5%			
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%						41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%					41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%		
C17	SI	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%				25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%			25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%		
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%				0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%			
	TOTAL	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%						25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%					25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%		
C18	SI	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%				25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%			25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%		
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%				0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%			
	TOTAL	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%						25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%					25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%		
C19	SI	32	22.9%	40	28.6%	44	31.4%	116	82.9%	76.6%	89.1%				33	23.6%	40	28.6%	45	32.1%	118	84.3%	78.3%	90.3%			33	23.6%	40	28.6%	45	32.1%	118	84.3%		
	NO	9	6.4%	9	6.4%	6	4.3%	24	17.1%	10.9%	23.4%				8	5.7%	9	6.4%	5	3.6%	22	15.7%	9.7%	21.7%			8	5.7%	9	6.4%	5	3.6%	22	15.7%		
	TOTAL	41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%						41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%					41	29.3%	49	35.0%	50	35.7%	140	100.0%		
C20	SI	16	11.4%	8	5.7%	49	35.0%	73	52.1%	43.9%	60.4%				16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%	44.6%	61.1%			16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%		
	NO	0	0.0%	0	0.0%	1	0.7%	1	0.7%	-0.7%	2.1%				0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%			
	TOTAL	16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%						16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%					16	11.4%	8	5.7%	50	35.7%	74	52.9%		
C21	SI	24	17.1%	41	29.3%			65	46.4%	38.2%	54.7%				24	17.1%	41	29.3%			65	46.4%	38.2%	54.7%			24	17.1%	41	29.3%			65	46.4%		
	NO	1	0.7%	0	0.0%			1	0.7%	-0.7%	2.1%				1	0.7%	0	0.0%			1	0.7%	-0.7%	2.1%			1	0.7%	0	0.0%	1	0.7%	-0.7%			
	TOTAL	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%						25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%					25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%		
C22	SI	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%				25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%	38.9%	55.4%			25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%		
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%				0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%			
	TOTAL	25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%						25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%					25	17.9%	41	29.3%			66	47.1%		



PARAMETROS	PI												RP1												RP2											
	6000 cGy				6750 cGy				7000 cGy				TOTAL				6000 cGy				6750 cGy				7000 cGy				TOTAL							
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	N	%	N	%	n	%	n	%	n	%	n	%	N	%	N	%								
C12	SI	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%							
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%							
	TOTAL	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	66	47.1%							
C13	SI			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%	44.6%	61.1%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%	44.6%	61.1%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%							
	NO			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%							
	TOTAL			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%	44.6%	61.1%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%	44.6%	61.1%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%							
C14	SI	46	32.9%	15	10.7%	59	42.1%	120	85.7%	79.9%	91.5%	45	32.1%	15	10.7%	58	41.4%	118	84.3%	78.3%	90.3%	46	32.9%	15	10.7%	58	41.4%	119	85.0%							
	NO	20	14.3%	0	0.0%	0	0.0%	20	14.3%	8.5%	20.1%	21	15.0%	0	0.0%	22	15.7%	9.7%	21.7%	21.7%	20	14.3%	0	0.0%	21	15.0%	21	15.0%								
	TOTAL	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	66	47.1%							
C15	SI	65	46.4%	15	10.7%	59	42.1%	139	99.3%	97.9%	100.7%	65	46.4%	15	10.7%	59	42.1%	139	99.3%	97.9%	100.7%	65	46.4%	15	10.7%	59	42.1%	139	99.3%							
	NO	1	0.7%	0	0.0%	0	0.0%	1	0.7%	-0.7%	2.1%	1	0.7%	0	0.0%	1	0.7%	-0.7%	2.1%	2.1%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1	0.7%								
	TOTAL	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	66	47.1%							
C16	SI	66	47.1%	15	10.7%	51	36.4%	132	94.3%	90.4%	98.1%	66	47.1%	14	10.0%	58	41.4%	138	98.6%	96.6%	100.5%	66	47.1%	14	10.0%	58	41.4%	138	98.6%							
	NO	0	0.0%	0	0.0%	8	5.7%	8	5.7%	1.9%	9.6%	0	0.0%	1	0.7%	2	1.4%	2	1.4%	-0.5%	3.4%	0	0.0%	1	0.7%	2	1.4%									
	TOTAL	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	66	47.1%							
C17	SI	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%							
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%							
	TOTAL	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%							
C18	SI	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%							
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%							
	TOTAL	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%							
C19	SI	52	37.1%	12	8.6%	52	37.1%	116	82.9%	76.6%	89.1%	53	37.9%	12	8.6%	53	37.9%	118	84.3%	78.3%	90.3%	53	37.9%	12	8.6%	53	37.9%	118	84.3%							
	NO	14	10.0%	3	2.1%	7	5.0%	24	17.1%	10.9%	23.4%	13	9.3%	3	2.1%	6	4.3%	22	15.7%	9.7%	21.7%	13	9.3%	3	2.1%	6	4.3%	22	15.7%							
	TOTAL	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	100.0%	66	47.1%	15	10.7%	59	42.1%	140	100.0%	66	47.1%							
C20	SI			15	10.7%	58	41.4%	73	52.1%	43.9%	60.4%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%	44.6%	61.1%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%							
	NO			0	0.0%	1	0.7%	1	0.7%	-0.7%	2.1%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%							
	TOTAL			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%	44.6%	61.1%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%	44.6%	61.1%			15	10.7%	59	42.1%	74	52.9%							
C21	SI	65	46.4%					65	46.4%	38.2%	54.7%	65	46.4%					65	46.4%	38.2%	54.7%	65	46.4%					65	46.4%							
	NO	1	0.7%					1	0.7%	-0.7%	2.1%	1	0.7%					1	0.7%	-0.7%	2.1%	1	0.7%					1	0.7%							
	TOTAL	66	47.1%					66	47.1%	38.2%	54.7%	66	47.1%					66	47.1%	38.2%	54.7%	66	47.1%					66	47.1%							
C22	SI	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%							
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%							
	TOTAL	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%	38.9%	55.4%	66	47.1%					66	47.1%							



Los resultados obtenidos en esta sección contribuyen a dar respuesta a la variable independiente: parámetros de planeación definida en la Tabla 14, en la Figura 17 se evidencian los resultados obtenidos para cada uno de los grupos de planes de tratamiento. Respecto a los planes iniciales 6 registros (4.3%) no satisfacen la variable independiente y con los planes generados con los modelos se tienen 3 registros (2.1%) que no cumplen con la variable; por tanto; los modelos disminuyeron la cantidad de planes que no cumplen el 50.0% respecto a los planes clínicos.

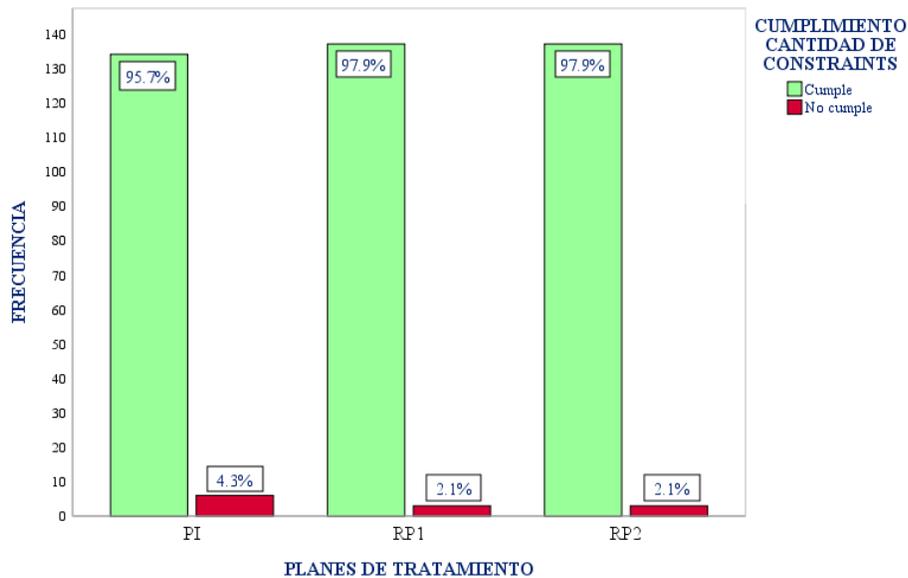


Figura 17.. Cumplimiento de la variable independiente: parámetros de planeación (PI, RP V1.0 y RP+MCO)

7.2.1.3 Puntuación planes de tratamiento

Para visualizar y clasificar los planes de tratamiento respecto a la evaluación de cada uno de los criterios (métricas) se generó un puntaje para estos mismos, teniendo en cuenta las consideraciones establecidas en la Tabla 11, las cuales van dirigidas a generar la puntuación de acuerdo con la dosis de prescripción, además, cada plan de tratamiento dependiendo de la estadiificación y la dosis de prescripción genera un determinado puntaje, por tanto; el puntaje global se normaliza al puntaje máximo (150 puntos) que se puede obtener y posteriormente se le asigna el porcentaje correspondiente. En la Figura 18 se puede apreciar el puntaje de los planes de tratamiento en términos de porcentaje para cada grupo de planes de tratamiento, los planes iniciales son representados por una media de 88.7 $DE[6.1]$ % con una puntuación mínima de 72.6% y máxima de 99.1%, por otro lado, para los planes generados con el modelo 1 se tiene una media de 91.2 $DE[4.7]$ % con un valor mínimo de 75.4% y máximo de 99.3%, mientras los planes de tratamiento generados con el modelo 2 son representados a través de una media de 91.9 $DE[4.6]$ %, con una puntuación mínima y máxima de 74.8% y 99.4% respectivamente. En la gráfica se evidencia una reducción del RIC y un incremento de la media, representando una mayor probabilidad de generar planes con puntajes altos con el modelo 2, además, se observa un incremento en el puntaje mínimo.

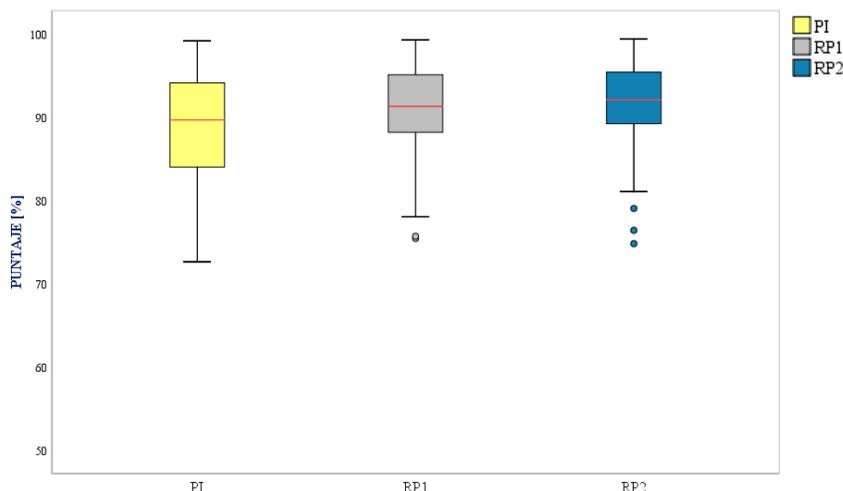


Figura 18.. Puntaje para los grupos de planes de tratamiento (PI, RP V1.0 y RP+MCO)

Por otra parte, se analiza la puntuación de los planes de tratamiento clasificados por estadio y dosis de prescripción, en la Tabla 23 se puede evidenciar que los planes categorizados como alto riesgo mejoran la mediana de la puntuación con el modelo 2 respecto a los planes iniciales en 8.2%, mientras que para bajo riesgo hay un incremento en la puntuación en aproximadamente el 1.4%, por otra parte, para riesgo intermedio no se tiene un cambio muy significativo (0.6%). En cambio, en la puntuación clasificada por dosis de prescripción se puede observar que para la dosis de 7000 cGy hay una mejora en la puntuación en un 8.0%, para dosis de 6750 cGy se tiene un incremento en el puntaje en un 3.1% y finalmente para la dosis de 6000 cGy se tiene un aumento en el puntaje en menor medida (0.7%).

Tabla 23.. Puntuación de los planes de verificación clasificados por estadios y dosis de prescripción

PARÁMETROS			PI				RP1				RP2			
			MED [%]	DE [%]	IC _{95%} INF [%]	IC _{95%} SUP [%]	MED [%]	DE [%]	IC _{95%} INF [%]	IC _{95%} SUP [%]	MED [%]	DE [%]	IC _{95%} INF [%]	IC _{95%} SUP [%]
ESTADIO	BR	41 29.3%	90.2	5.1	88.2	91.4	91.1	5.1	89.0	92.2	91.5	5.1	89.4	92.6
	RI	49 35.0%	94.2	4.2	91.5	93.9	94.7	3.9	92.6	94.8	94.8	4.0	92.8	95.1
	AR	50 35.7%	83.8	5.0	82.3	85.2	89.4	4.0	88.0	90.3	90.7	4.1	89.4	91.7
TOTAL		140 100.0%												
DOSIS DE PRESCRIPCIÓN	6000 cGy	66 47.1%	92.2	5.1	89.9	92.4	92.6	5.0	90.7	93.1	92.8	5.0	90.9	93.3
	6750 cGy	15 10.7%	91.5	3.4	90.0	93.7	93.6	4.0	90.6	95.1	94.3	3.7	91.7	95.8
	7000 cGy	59 42.1%	84.5	5.8	83.6	86.6	90.1	4.4	88.8	91.0	91.3	4.3	90.1	92.3
TOTAL		140 100.0%												

Asimismo, se realizó un tipo de clasificación de los planes de tratamiento, como: óptimos, aceptables y no aceptables, de acuerdo con las especificaciones establecidas en la Tabla 12. A continuación, en la Figura 19 se puede observar las categorías de los planes y la cantidad de cada uno de estos de acuerdo con su clasificación. Se realizó este análisis para cada uno de los grupos de planes como son los planes originales y los planes generados por los modelos de planeación. Se evidencia que los modelos de planeación incrementan el número de planes categorizados como óptimos a comparación de los planes originales, el modelo 1 incrementa la cantidad en 21 registros estos representan un incremento del 15.0% respecto a los planes originales, por otro lado, con el modelo 2 se mejoran 34 planes los



cuales representan un incremento del 24.3%, mientras el modelo 2 mejora 13 planes siendo un aumento del 9.3% respecto al modelo 1.

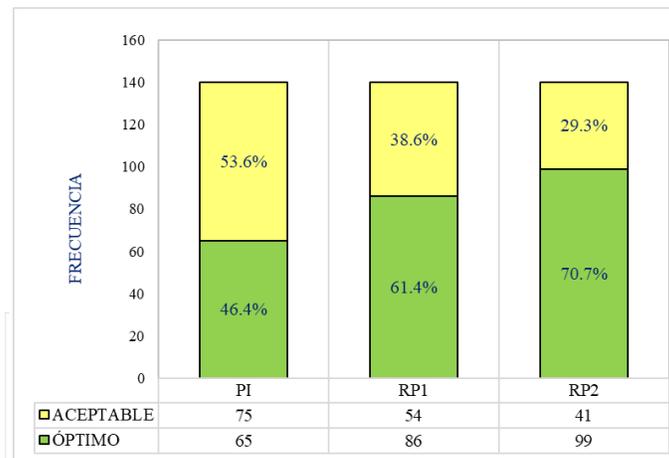


Figura 19.. Descripción de las categorías (óptimo, aceptable y no aceptable) para los grupos de planes de tratamiento

Análisis y discusión

De acuerdo con la información obtenida tanto en la Figura 18 como en la Figura 19 se puede apreciar que la media de los planes generados con el modelo 2 incrementa respecto a los planes originales en el 3.6%, además el modelo de planeación 2 cambia de categoría a 34 planes de tratamiento, por tanto, con estos resultados se puede observar que el modelo de planeación mejora las métricas de evaluación y esto se ve reflejado en la asignación del puntaje global. También al clasificar el puntaje de los planes por estadificación y dosis de prescripción se puede evidenciar que los planes generados con los modelos mejoran este mismo, sin embargo; el modelo 2 produce planes de tratamiento con mejor puntaje en comparación con los otros dos planes, de donde se puede decir que los planes con aumento en la puntuación son los de alto riesgo, mientras que con la dosis de prescripción se trata de la dosis de 7000 cGy, adicionalmente se debe considerar que esta dosis está relacionada directamente con el estadio de alto riesgo en un 35.0% del 42.1% que representa.

Finalmente, los resultados de la puntuación de los planes de tratamiento conllevan a dar respuesta a la variable independiente: Constraints definida en la Tabla 14, en el análisis para los tres grupos de planes de tratamiento se tiene una satisfacción del 100.0% de los datos.

Multivariado

De acuerdo con los resultados obtenidos respecto al incremento en los constraints para el recto se realizó un análisis multivariado para determinar si el tamaño de la estructura anatómica influye o es un factor de riesgo en el puntaje global, para esto se clasificó el volumen del recto como grande para los datos que sean superiores a la media 50.6 cc y para los datos menores a la media se los designo como pequeño. Los resultados se consignaron en la Tabla 24, donde se puede observar que hay una asociación no significativa entre el tamaño



del recto y la clasificación como un plan aceptable (puntuación global) para los tres grupos de planes de tratamiento, por tanto; el tamaño de la estructura no es un factor de riesgo para la puntuación de los planes de tratamiento (no afecta a la calidad del plan).

Tabla 24.. Análisis multivariado para determinar si el volumen del recto afecta en el puntaje global

PLAN	ESTRUCTURA		¿AFECTA EL VOL DEL RECTO EN EL PUNTAJE?		TOTAL	ODDS RATIO	IC _{95%}		TIPO DE ASOCIACIÓN
			ACEPTABLE	ÓPTIMO			INF	SUP	
PI	TAMAÑO DEL RECTO	GRANDE	30	33	63	0.6	0.3	1.3	NO SIGNIFICATIVA
			21.4%	23.6%	45.0%				
	PEQUEÑO	45	32	77					
		32.1%	22.9%	55.0%					
	TOTAL		53.6%	46.4%	100.0%				
RP1	TAMAÑO DEL RECTO	GRANDE	20	43	63	0.6	0.3	1.2	NO SIGNIFICATIVA
			14.3%	30.7%	45.0%				
	PEQUEÑO	34	43	77					
		24.3%	30.7%	55.0%					
	TOTAL		38.6%	61.4%	100.0%				
RP2	TAMAÑO DEL RECTO	GRANDE	15	48	63	0.6	0.3	1.3	NO SIGNIFICATIVA
			10.7%	34.3%	45.0%				
	PEQUEÑO	26	51	77					
		18.6%	36.4%	55.0%					
	TOTAL		29.3%	70.7%	100.0%				

7.2.1.4 Índice de homogeneidad y conformidad

Dentro de los parámetros de calidad establecidos se encuentran definidos los índices de homogeneidad y de conformidad evaluados para cada uno de los registros.

Para la descripción del comportamiento tanto del índice de homogeneidad como el índice de conformidad se generaron las siguientes gráficas: Figura 20 y Figura 21, donde se puede observar la distribución de cada una de estas variables para cada uno de los casos de los planes de tratamiento, como son: plan inicial, modelo RapidPlan V1,0 (RP V1.0) y modelo RapidPlan+MCO V2.0 (RP+MCO).

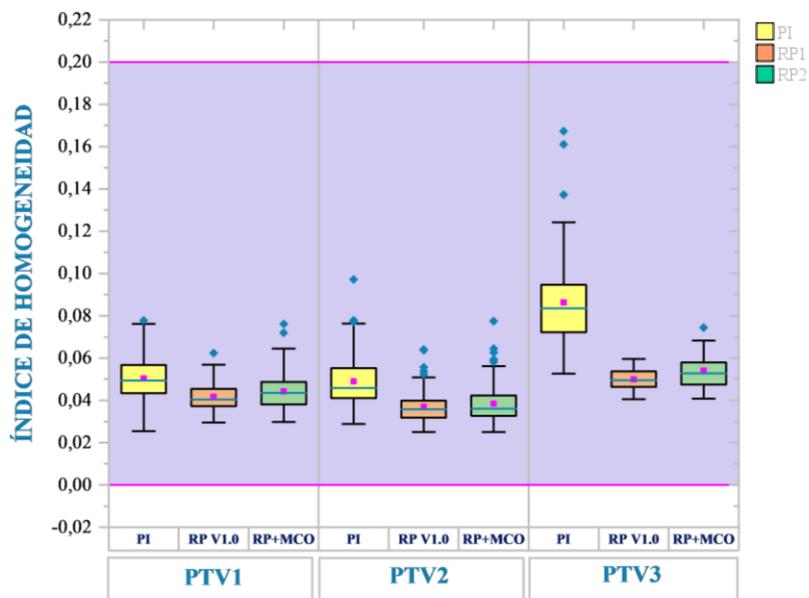


Figura 20.. Representación del índice de homogeneidad para cada uno de los PTV's para los tres grupos de planes de tratamiento dentro de la franja de tolerancia (0 y 0.2)



En la Figura 20, se compara el índice de homogeneidad obtenido para cada uno de los grupos de planes de tratamiento categorizados por cada PTV. Adicionalmente, en la gráfica se puede observar una franja la cual está definida entre los límites de tolerancia aceptables para la evaluación del índice de homogeneidad, dichos parámetros están consignados en la Tabla 14, de la gráfica se resalta que todos los planes de tratamiento cumplen con dicho criterio, por tanto; se tiene una satisfacción o cumplimiento de índice de homogeneidad para la totalidad de los planes de tratamiento.

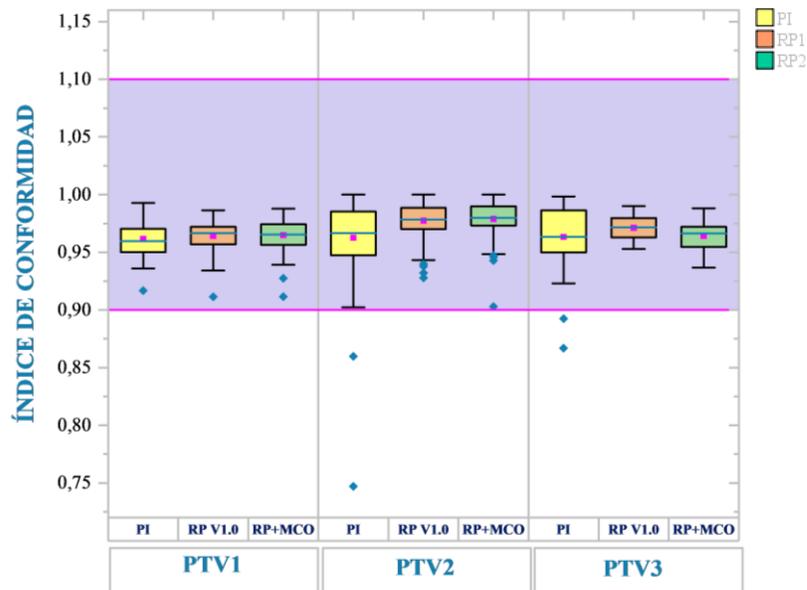


Figura 21.. Representación del índice de conformidad para cada uno de los PTV's para los tres grupos de planes de tratamiento dentro de la franja de tolerancia (0.9 y 1.1)

En la Figura 21 se visualizan las gráficas que representan la distribución de los datos del índice de conformidad para cada uno de los PTV's. Seguidamente se prosigue a determinar los planes que cumplen con los intervalos de tolerancias establecidos para el índice de conformidad definidos en la Tabla 14, sección de variables de calidad.

Sin embargo, en la Figura 21 se puede evidenciar que para el índice de conformidad se tienen algunos planes que no cumplen con los límites de tolerancia establecidos (no se encuentran dentro de la franja de tolerancia), como lo son los planes iniciales tanto para el PTV2 como para el PTV3. Por lo tanto, se infiere que son 4 planes de tratamiento distintos que no cumplen con los límites de tolerancia de dicho índice, 2 registros no satisfacen el intervalo para PTV2 y los 2 planes restantes no cumplen con los límites de tolerancia para PTV3.

Análisis y discusión:

Para PTV1 la mediana de los planes originales es de 0.050 DE [0.011], mientras los planes generados por el modelo 1 tiene una mediana de 0.040 DE [0.006] y los del modelo 2 de 0.044 DE [0.008], además el rango intercuartílico es de 0.014, 0.009 y 0.011 para planes iniciales, modelo 1 y modelo 2 respectivamente, por lo tanto, la mediana del modelo



2 en comparación con el plan inicial disminuyó en 12.0%, además de presentar los datos con menor variabilidad al tener una reducción del RIC (21.4%), mientras para PTV2 la mediana para los planes originales es de 0.046 *DE*[0.013], para los planes generados por los modelos es de 0.036 *DE*[0.008], el rango intercuartílico de los planes originales es de 0.014, mientras que para los modelos 1 y 2 es de 0.008 y de 0.009 respectivamente, para PTV2 se siente una reducción de la mediana para ambos modelos respecto al plan original de 21.7%, mientras que el RIC disminuye en 35.7%, finalmente para el PTV3 la mediana de los datos originales es de 0.084 *DE*[0.024], de 0.050 *DE*[0.005] para los del modelo 1 y de 0.053 *DE*[0.007] para el modelo 2, el rango intercuartílico de los planes originales es de 0.024, del modelo 1 de 0.008 y del modelo 2 de 0.011, por lo tanto; para PTV3 la disminución de la mediana entre los planes generados con el modelo 2 y los planes originales es de 35.7% y la variabilidad se reduce en 54.2%.

En la Figura 20 del índice de homogeneidad, se puede constatar que hay una disminución en la brecha de distribución entre los planes generados con los modelos respecto a los creados de forma manual, para los planes originales se observa que los datos se encuentran distribuidos en un rango más amplio y la media de los datos está más alejada del valor óptimo del índice de homogeneidad, representado como $IH = 0$, mientras al hacer uso de los modelos se tiene una disminución de la variabilidad de los datos (mayor uniformidad de la dosis en el PTV), por lo tanto, los valores más alejados respecto a los datos más frecuentes se convierten en puntos atípicos y la media tiende a acercarse más al valor ideal establecido, según el ICRU 83 [29]. Sin embargo; se puede observar que MCO genera más dispersión en los datos a comparación con el modelo 1, considerando que el rango intercuartílico en los 3 PTV's disminuye para los planes generados con los modelos, pero los que tienen la brecha más estrecha son los del modelo 1.

Para la descripción del índice de conformidad se realiza la evaluación de la mediana para el PTV1 para los planes iniciales es de 0.960 *DE*[0.013], modelo 1 de 0.967 *DE*[0.012] y modelo 2 de 0.966 *DE*[0.012], mientras el rango intercuartílico es de 0.020, 0.015 y 0.019 para los planes iniciales, modelo 1 y modelo 2 respectivamente, el incremento en la mediana en comparación de los planes iniciales y los del modelo 2 es de 0.6%, por otro lado, para el PTV2 los planes originales están representados por una mediana de 0.967 *DE*[0.035], de 0.978 *DE*[0.015] para el modelo 1 y de 0.980 *DE*[0.016] para el modelo 2, con rangos intercuartílicos de 0.038 para los planes originales, de 0.019 para los del modelo 1 y de 0.017 para el modelo 2, la mediana mejora en 1.3% y el RIC en 55.3% para los planes generados con el modelo 2. Finalmente, PTV3 tiene distribuciones de los datos con medianas de 0.964 *DE*[0.027] plan inicial, 0.972 *DE*[0.010] para los planes del modelo 1 y 0.966 *DE*[0.013] para el modelo 2, y rangos intercuartílicos de 0.036 y 0.017 para el plan inicial y para los modelos de planeación respectivamente, la mediana de los datos mejora en 0.3% para los planes del modelo final y el RIC reduce la variabilidad en 52.8%.

La distribución de los datos del índice de conformidad es reducida para los planes generados con los modelos, se tienen distribuciones más homogéneas, también se debe



recalcar que el PTV2 es el blanco que se acerca más al valor óptimo de $IC = 1$, conllevando a confirmar la hipótesis de que el uso de los modelos contribuye en la disminución de la variabilidad entre planificadores, puesto que, esta actividad es llevada a cabo por diferentes personas y es sesgada por la experiencia de estas mismas al realizar dicha actividad.

Por lo tanto, se puede confirmar que los planes generados con los modelos logran reproducir planes de alta calidad. Adicionalmente, se determina de forma cualitativa el número de planes de tratamiento que cumplen con los límites establecidos para cada uno de los índices de calidad de forma independiente, de donde se puede visualizar que el índice de homogeneidad es más factible su cumplimiento, mientras que el índice de conformidad tiene algunos planes que no cumplen con dichos límites de tolerancia. Los hallazgos en este apartado corroboran la información proporcionada en la bibliografía [74], [75] en la cual se muestra que los planes generados con los modelos mantienen o mejoran la cobertura de los PTV's respecto a los planes clínicos.

Los resultados obtenidos en este apartado dan respuesta a las variables independientes: índice de conformidad e índice de homogeneidad definidas en la Tabla 14, para la variable del índice de homogeneidad se tiene el cumplimiento del 100.0% de los datos para los tres grupos de planes de tratamiento, mientras en la evaluación de la variable del índice de conformidad para los planes originales no hay cumplimiento de 4 registros (2.86%), sin embargo; para los planes generados los modelos se tiene la satisfacción del 100.0% de los datos.

7.2.1.5 *Índice gamma*

Seguidamente se realiza la descripción del índice gamma de los registros usados en el entrenamiento de los modelos, donde se va a determinar la concordancia entre los planes de tratamiento, considerando sí se tiene resultados $\geq 95\%$ se hablaría de una igualdad entre estos; sin embargo, a medida que se alejen de dicho valor demuestran la diferencia existente entre estos mismos. Para la evaluación del índice gamma se realizó una comparativa entre los planes de tratamiento. Inicialmente se ejecutó para los planes originales vs los planes generados con el modelo de planeación 1 (PI vs RP1), posteriormente se compararon los planes originales con los planes generados con el modelo 2 (PI vs RP2) y finalmente se equipararon los planes del modelo 1 con los generados por el modelo 2 (RP1 vs RP2), como se muestra en la Figura 22.

Como se puede observar en la Figura 22 el análisis realizado en este caso abarca los planes de entrenamiento (140 registros) dentro de tres categorías, en la primera se hace la comparación entre los planes originales y los del modelo 1, estos son representados por una media de $59.4 DE[7.3]\%$, mientras que el segundo diagrama se enfoca en los planes originales y los del modelo final con una media de $56.7 DE[7.1]\%$ y finalmente en el último diagrama hay una confrontación entre los planes generados con los modelos, con una media de $73.2 DE[6.6]\%$. Se observan diferencias grandes, por tanto, se puede inferir que los planes tienen diferentes distribuciones dosimétricas (es lo ideal).

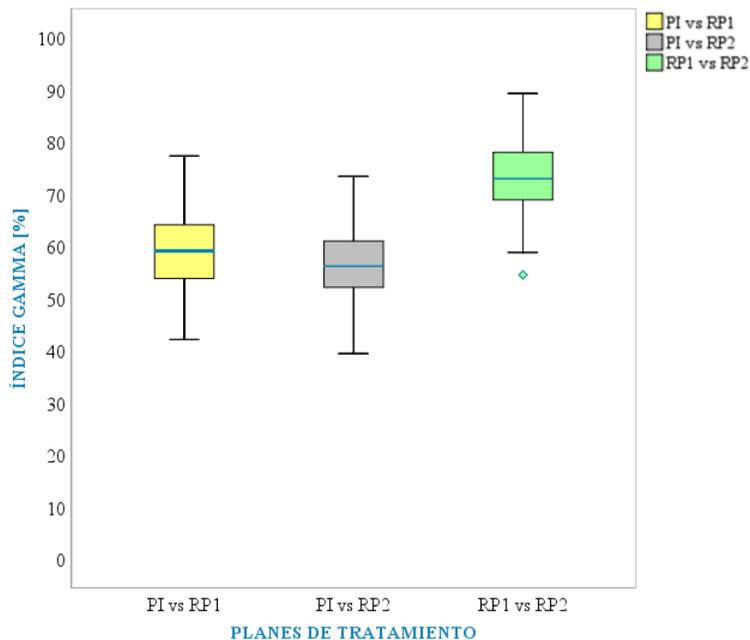


Figura 22.. Evaluación del índice gamma, PI vs RP1, PI vs RP2 y RP1 vs RP2

Posteriormente se realiza el respectivo análisis del índice gamma, equiparando los diferentes planes, en este apartado se tiene la clasificación por estadificación de los registros de pacientes, como se muestra en la Figura 23.

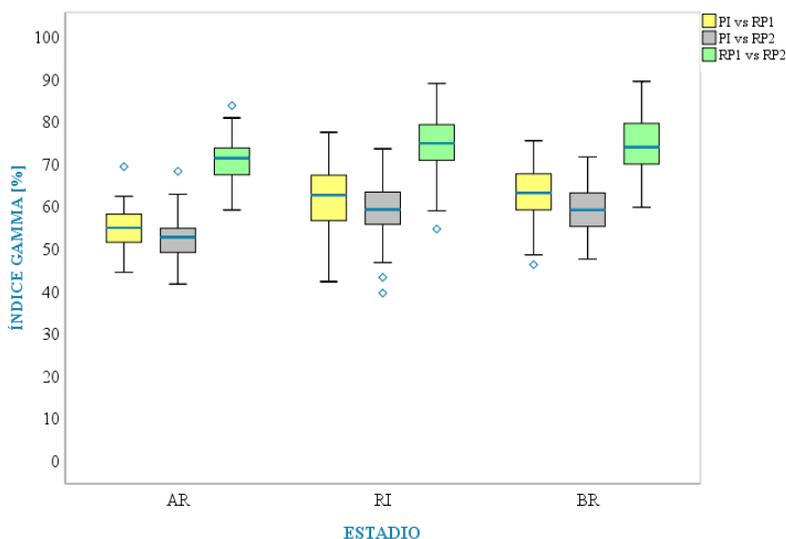


Figura 23.. Evaluación del índice gamma conforme a la estadificación (bajo riesgo: BR, riesgo intermedio: RI y alto riesgo: AR)

La información respecto a la evaluación del índice gamma de acuerdo con la estadificación está consignada en la Tabla 25. Sin embargo; para los registros de alto riesgo en la comparación entre el plan inicial y el generado por el primer modelo son representados por una mediana de 54.8 % RIC[6.7] %.



Tabla 25.. Evaluación del índice gamma por estadios

ESTADIO	VAL. ESTADÍSTICO	PI vs RP V1.0	PI vs RP+MCO	RP V1.0 vs RP+MCO
BR	MEDIA	61.4%	59.0%	74.7%
	DE	7.4%	7.3%	7.0%
	MÍNIMO	42.1%	39.4%	54.5%
	MÁXIMO	77.3%	73.4%	88.8%
RI	MEDIA	62.4%	59.4%	74.3%
	DE	6.8%	6.6%	6.8%
	MÍNIMO	46.1%	47.4%	59.6%
	MÁXIMO	75.3%	71.5%	89.3%
AR	MEDIA		52.3%	70.8%
	DE		5.2%	5.4%
	MÍNIMO		41.5%	59.0%
	MÁXIMO		68.1%	83.6%

Análisis y discusión

La estimación del índice gamma se realiza al confrontar los diferentes planes de tratamiento, como son el plan inicial vs RP1, plan inicial vs RP2 y finalmente RP1 vs RP2, de donde se puede observar que los planes que mayor semejanza tienen están representados por una coincidencia de puntos con la media por encima del 70.0%, por lo tanto, la diferencia de estos es de 28.6%, datos correspondientes a los generados por los modelos, mientras para la equiparación de cualquiera de los planes realizados con alguno de los modelos y el plan inicial se evidencia una menor concordancia, por lo cual se puede observar que entre menor sea el criterio gamma hay mayor cambio entre los planes. Se puede visualizar que los planes que poseen mayores cambios son los del modelo 2 a comparación con los del modelo 1, ya que estos difieren en un 4.5%. Considerando los resultados obtenidos se puede inferir que en relación con los planes iniciales y los planes del modelo 2 se tiene una mayor diferencia en comparación con los del modelo 1, debido a que los planes con los que se alimentó el modelo 2 fueron modificados con MCO, por tanto, se puede constatar la diferencia de modulación del haz en estos planes. Mientras el modelo 1 se entrenó con los planes originales, por lo tanto, la distribución de la dosis tiene mayor concordancia con dichos planes.

Para la evaluación del índice gamma categorizado por estadios se puede evidenciar, que para los tres estadios hay una reducción del índice gamma para la equiparación de los planes iniciales con los generados con el modelo 2 respecto a los del modelo 1 y para la estadificación que tiene mayor diferencia es para los planes de tratamiento de riesgo intermedio con una diferencia entre las medianas de 4.8%, seguido de los planes clasificados como alto riesgo con 4.6% y para bajo riesgo de 3.9%.

Además, se debe tomar en cuenta que son planes diferentes, por tanto, coincidencias más cercanas representan que no habría diferencias notorias entre los modelos y se podría usar cualquiera de los dos. Adicionalmente, estos planes a pesar de ser planes diferentes comparten información dosimétrica similar, el modelo 2 depende del entrenamiento del modelo 1, pero como se puede observar hay una variación notoria en los nuevos planes respecto a los iniciales, ya que, con los modelos se tiene soluciones que probablemente en los planes originales no se contemplaron y por tanto se reduce la dosis para los OAR's,



Est	Evaluación constraints (PI y RP2)	Razón (PI/PI y RP2/PI)
BP: $D_{mean} \leq 5200 \text{ cGy}$ $D_{max} \leq 5000 \text{ cGy}$		
CFD: $D_{max} \leq 6800 \text{ cGy}$		
CFD: $V_{4080} \text{ cGy} \leq 50.0\%$		
CFD: $V_{5000} \text{ cGy} \leq 10.0\%$		



Est	Evaluación constraints (PI y RP2)	Razón (PI/PI y RP2/PI)
CFI: $D_{max} \leq 6800$ cGy		
CFI: $V_{4080} \leq 50.0\%$		
CFI: $V_{5000} \leq 10.0\%$		
INT: $D_{0,1cc} \leq 5000$ cGy		



Est	Evaluación constraints (PI y RP2)	Razón (PI/PI y RP2/PI)
INT: $V4080\text{ cGy} \leq 17.0\text{ cc}$		
MED: $D_{max} \leq 4500\text{ cGy}$		
RECTO: $V7000\text{ cGy} \leq 10.0\text{ cc}$		
RECTO: $V7000\text{ cGy} \leq 10.0\%$ $V6000\text{ cGy} \leq 3.0\%$		



Est	Evaluación constraints (PI y RP2)	Razón (PI/PI y RP2/PI)
RECTO: $V6500 \text{ cGy} \leq 22.0\%$ $V5700 \text{ cGy} \leq 15.0\%$		
RECTO: $V4000 \text{ cGy} \leq 52.0\%$ $V5280 \text{ cGy} \leq 30.0\%$		
RECTO: $V4860 \text{ cGy} \leq 50.0\%$		
RECTO: $V4080 \text{ cGy} \leq 60.0\%$		



Est	Evaluación constraints (PI y RP2)	Razón (PI/PI y RP2/PI)
VEJIGA: $V_{6500} cGy \leq 10.0\%$ $V_{6000} cGy \leq 5.0\%$		
VEJIGA: $D_{50\%} \leq 5000 cGy$		
VEJIGA: $V_{4860} cGy \leq 25.0\%$		
VEJIGA: $V_{4080} cGy \leq 50.0\%$		

En esta etapa se realiza el análisis de las variables de calidad de planeación para planes de tratamiento externos a los que se usaron en el entrenamiento de los modelos (30 registros), con las gráficas consignadas en la Tabla 26 se puede observar que para C3 hay una reducción



tanto en la media (en un 39.7%) como el rango intercuartílico de los datos, para la cabeza femoral derecha C4 se puede observar que hay una reducción de la media del 32.8% y a la vez una disminución en el rango intercuartílico, también para la cabeza femoral izquierda se tiene una reducción para C7 tanto en la media en 29.6% como en el RIC, para el intestino delgado se puede observar una reducción tanto en la media (13.9%) como en el rango intercuartílico, mientras que para la médula se observa una leve reducción en la media (13.6%), en C13 se evidencia un aumento en la media de 4.3% y un incremento en el rango intercuartílico, para C14 se tiene un incremento tanto en la media (10.8%) como en el RIC, C15 reproduce prácticamente los datos de los planes originales con una media de 7.7%, para C16 se aprecia un decrecimiento de la media en 10.1%, en C17 y C18 hay reducción en la media (7.4% y 9.4% respectivamente), con forme a C19 la media disminuye en 11.6%, para C20 se observa que hay una leve disminución de la media de 12.4%, para C21 y C22 se evidencia una disminución de la media (20.1% y 22.3%). Al evaluar cada uno de los constraints los resultados con porcentajes menores indican que los planes generados con los modelos logran reproducir los planes iniciales, mientras que los porcentajes mayores indican una mejoría en los límites establecidos.

Adicionalmente se evalúa la razón entre los planes de tratamiento generados por el modelo 2 y los planes iniciales, en la Tabla 27 se puede observar que los planes son categorizados de acuerdo con el valor de la razón, para luego asignar una categoría, los planes que logran reproducir los valores originales se clasifican en la categoría de IGUAL, mientras los registros que logren reducir el constraint respecto al plan inicial se clasifica como MEJORA, mientras para los planes que sufran un detrimento respecto al plan base se consideran como NO MEJORA.

Tabla 27.. Categorización de los planes de tratamiento de acuerdo con la evaluación de la razón (IGUAL, MEJORA y NO MEJORA)

PARÁMETROS			RP2/PI						
ESTRUCTURA	CONSTRAINT	n	IGUAL	%	MEJORA	%	NO MEJORA	%	TOTAL
BP	C1	30	27	90.0%	3	10.0%	0	0.0%	100.0%
	C2	30	29	96.7%	1	3.3%	0	0.0%	100.0%
	C3	30	0	0.0%	30	100.0%	0	0.0%	100.0%
CFD	C4	18	0	0.0%	18	100.0%	0	0.0%	100.0%
	C5	12	12	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	100.0%
	C6	30	28	93.3%	2	6.7%	0	0.0%	100.0%
CFI	C7	18	0	0.0%	18	100.0%	0	0.0%	100.0%
	C8	12	12	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	100.0%
	C9	30	29	96.7%	1	3.3%	0	0.0%	100.0%
INT	C10	18	0	0.0%	16	88.9%	2	11.1%	100.0%
	C11	12	12	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	100.0%
MED	C12	30	0	0.0%	27	90.0%	3	10.0%	100.0%
RECTO	C13	18	3	16.7%	7	38.9%	7	38.9%	94.4%
	C14	30	5	16.7%	10	33.3%	14	46.7%	96.7%
	C15	30	0	0.0%	18	60.0%	12	40.0%	100.0%
	C16	30	0	0.0%	21	70.0%	9	30.0%	100.0%
	C17	12	0	0.0%	8	66.7%	4	33.3%	100.0%
	C18	12	0	0.0%	9	75.0%	3	25.0%	100.0%
VEJIGA	C19	30	3	10.0%	23	76.7%	4	13.3%	100.0%
	C20	18	0	0.0%	11	61.1%	7	38.9%	100.0%
	C21	12	0	0.0%	12	100.0%	0	0.0%	100.0%
	C22	12	0	0.0%	12	100.0%	0	0.0%	100.0%



Seguidamente se tiene la evaluación de los constraints a través de la razón clasificados por estadios como se puede observar en la Tabla 28.

Tabla 28.. Evaluación de la razón entre los planes originales y los generados con el modelo 2 (RP2/PI) categorizados por estadios

PARÁMETROS		BR				RI				AR			
ESTRUCTURA	CONSTRAINT	MEDIA	DE	MIN	MAX	MEDIA	DE	MIN	MAX	MEDIA	DE	MIN	MAX
BP	C1 (%)	0.9	0.3	0.0	1.0	0.8	0.4	0.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0
	C2 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.3	0.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0
	C3 (cGy)	0.6	0.1	0.5	0.7	0.6	0.2	0.3	0.9	0.7	0.2	0.4	0.9
CFD	C4 (cGy)	0.8	0.1	0.7	0.9	0.7	0.1	0.6	0.8	0.6	0.1	0.4	0.9
	C5 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0				
	C6 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.8	0.4	0.0	1.0
CFI	C7 (cGy)	0.8	0.1	0.7	0.9	0.7	0.1	0.6	0.8	0.7	0.1	0.4	0.9
	C8 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0				
	C9 (%)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.9	0.3	0.0	1.0
INT	C10 (cGy)	0.8	0.0	0.7	0.9	0.8	0.1	0.7	0.8	0.9	0.1	0.7	1.1
	C11 (cc)	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0				
MED	C12 (cGy)	0.9	0.1	0.7	1.0	0.9	0.0	0.9	1.0	0.7	0.2	0.5	1.0
RECTO	C13 (cc)	1.1	0.8	0.0	2.0	1.3	0.9	0.4	2.2	0.9	0.3	0.6	1.6
	C14 (%)	1.0	0.5	0.0	1.8	1.4	0.6	0.4	2.4	0.9	0.3	0.6	1.6
	C15 (%)	0.9	0.3	0.6	1.4	1.0	0.3	0.5	1.3	0.9	0.2	0.6	1.2
	C16 (%)	0.9	0.2	0.7	1.3	1.0	0.2	0.6	1.3	0.8	0.1	0.6	1.1
	C17 (%)	0.9	0.1	0.7	1.1	1.0	0.3	0.6	1.3				
	C18 (%)	0.9	0.1	0.7	1.1	0.9	0.3	0.6	1.4				
VEJIGA	C19 (%)	0.9	0.1	0.8	1.0	0.8	0.2	0.5	1.0	0.9	0.2	0.6	1.2
	C20 (cGy)	0.8	0.0	0.7	0.8	0.7	0.0	0.7	0.7	1.0	0.2	0.7	1.3
	C21 (%)	0.8	0.0	0.7	0.8	0.8	0.1	0.7	1.0				
	C22 (%)	0.8	0.0	0.7	0.8	0.8	0.1	0.7	1.0				

De la Tabla 28 se puede destacar información relevante, para el bulbo peneano el criterio que presenta mejoría es C3, para los tres estadios, para bajo riesgo y riesgo intermedio en un 40.0% y para alto riesgo en 30.0%, para las métricas de evaluación de las cabezas femorales se evidencia que hay mejoría para C4 y C7 con, 20.0%, 30.0% y 40.0% para bajo riesgo, riesgo intermedio y alto riesgo respectivamente, sin embargo; para C4 y alto riesgo la mejoría es del 40.0%. Por otro lado, C10 logra reducir el constraint en 20.0% para bajo riesgo y riesgo intermedio, mientras para alto riesgo es de 10.0%. Para la médula C12 tiene mejoría para alto riesgo con un 30.0%. Respecto al recto se evidencia que hay detrimento para C13 y C14, para C13 y planes de bajo riesgo es de 10.0% y para riesgo intermedio de 30.0%, mientras que para alto riesgo hay una mejoría del 10.0%, respecto a C14 los planes de riesgo intermedio tienen un incremento del 40.0%, mientras para bajo riesgo se logra reproducir los datos originales, para los planes de alto riesgo se mejora el valor en 10.0%, las métricas restantes logran reducir el porcentaje de volumen que recibe una determinada dosis en aproximadamente el 10.0%. En cuanto a la vejiga se observa que C20 reduce en un 30.0% para riesgo intermedio, mientras C21 y C22 tienen mejoras del 20.0%.

Análisis y discusión

Tras evaluar tanto los constraints como la razón entre los resultados de los modelos respecto al plan inicial, se puede observar que hay mejoras para algunos de los órganos a riesgo, de forma más notoria, como lo es para C3, C4, C7, C21 y C22 con una reducción en la mediana de (39.7%, 32.8%, 29.6%, 20.1% y 22.3% respectivamente), sin embargo; se puede evidenciar que algunos constraints sufren detrimento como, C13 y C14 con 4.3% y 10.8% respectivamente, estos hacen parte de los criterios de evaluación del recto.



Finalmente, los criterios restantes logran reproducir los valores de los planes iniciales o mejoran en menor proporción la cual no supera el 15.0%. Con los resultados se puede deducir que el modelo de planeación basado en el conocimiento mejora el 77.3% de los constraints, reproduce los valores del plan inicial en el 13.6% y sufren detrimento del 9.1%, esto conlleva a inferir que el uso del modelo de planeación basado en el conocimiento para registros de tratamiento que no pertenecen al grupo de entrenamiento logra mejorar o mantener los valores de los planes iniciales en mayor proporción (90.9%) a comparación del detrimento que logra sufrir los criterios del recto (para dosis altas).

7.2.2.2 Cumplimiento de constraints

Para la evaluación del cumplimiento de dichos valores de tolerancia se realiza el respectivo conteo de la satisfacción de las condiciones de estos mismos. Discriminando la información por estadificación y por dosis de prescripción como se puede evidenciar en las siguientes tablas. En estas se resaltaron en verde los casos relevantes.

Tabla 29.. Cumplimiento de constraints categorizados por estadios

PARÁMETROS		PI										RP2									
		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}	
		n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup	n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup
C1	SI	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%	
C2	SI	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%	
C3	SI	10	33.3%	9	30.0%	10	33.3%	29	96.7%	90.2%	103.1%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	1	3.3%	0	0.0%	1	3.3%	-3.1%	9.8%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%	
C4	SI	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18		60.0%		5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18		60.0%	
C5	SI	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	5	16.7%	7	23.3%			12		40.0%		5	16.7%	7	23.3%			12		40.0%	
C6	SI	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%	
C7	SI	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18		60.0%		5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18		60.0%	
C8	SI	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	5	16.7%	7	23.3%			12		40.0%		5	16.7%	7	23.3%			12		40.0%	
C9	SI	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%	
C10	SI	5	16.7%	3	10.0%	4	13.3%	12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	3	10.0%	3	10.0%	11	36.7%	19.4%	53.9%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	6	20.0%	6	20.0%	5.7%	34.3%	0	0.0%	0	0.0%	7	23.3%	7	23.3%	8.2%	38.5%
	TOTAL	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18		60.0%		5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18		60.0%	
C11	SI	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	5	16.7%	7	23.3%			12		40.0%		5	16.7%	7	23.3%			12		40.0%	
C12	SI	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
	TOTAL	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30		100.0%	



PARÁMETROS		PI										RP2									
		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}	
		n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup	n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup
C13	SI	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%		5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%		5	16.7%
C14	SI	7	23.3%	8	26.7%	10	33.3%	25	83.3%	70.0%	96.7%	7	23.3%	8	26.7%	10	33.3%	25	83.3%	70.0%	96.7%
	NO	3	10.0%	2	6.7%	0	0.0%	5	16.7%	3.3%	30.0%	3	10.0%	2	6.7%	0	0.0%	5	16.7%	3.3%	30.0%
TOTAL		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%
C15	SI	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%
C16	SI	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%	10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%
C17	SI	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%
C18	SI	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%
C19	SI	10	33.3%	8	26.7%	8	26.7%	26	86.7%	74.5%	98.8%	10	33.3%	9	30.0%	9	30.0%	28	93.3%	84.4%	102.3%
	NO	0	0.0%	2	6.7%	2	6.7%	4	13.3%	1.2%	25.5%	0	0.0%	1	3.3%	1	3.3%	2	6.7%	-2.3%	15.6%
TOTAL		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%	10	33.3%	10	33.3%	30	100.0%		10	33.3%
C20	SI	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%	5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%		5	16.7%	3	10.0%	10	33.3%	18	60.0%		5	16.7%
C21	SI	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%
C22	SI	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%	5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%			0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%	7	23.3%			12	40.0%		5	16.7%

Posteriormente se realiza la evaluación del cumplimiento de los constraints categorizados por dosis de prescripción.

Tabla 30.. Cumplimiento de constraints categorizados por dosis de prescripción

PARÁMETROS		PI										RP2									
		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}	
		n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup	n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup
C1	SI	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%
C2	SI	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%
C3	SI	11	36.7%	3	10.0%	15	50.0%	29	96.7%	90.2%	103.1%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	1	3.3%	0	0.0%	0	0.0%	1	3.3%	-3.1%	9.8%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%
C4	SI			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL				3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%				3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%			
C5	SI	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%					12	40.0%		12	40.0%					12	40.0%		12	40.0%
C6	SI	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%		12	40.0%



PARÁMETROS		PI										RP2									
		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}		BR		RI		AR		TOTAL		IC _{95%}	
		n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup	n	%	n	%	n	%	N	%	Inf	Sup
C7	SI			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%	
C8	SI	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%					12		40.0%		12	40.0%					12		40.0%	
C9	SI	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%	
C10	SI			3	10.0%	9	30.0%	12	40.0%	22.5%	57.5%			3	10.0%	8	26.7%	11	36.7%	19.4%	53.9%
	NO			0	0.0%	6	20.0%	6	20.0%	5.7%	34.3%			0	0.0%	7	23.3%	7	23.3%	8.2%	38.5%
TOTAL				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%	
C11	SI	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%					12		40.0%		12	40.0%					12		40.0%	
C12	SI	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%	
C13	SI			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%	
C14	SI	6	20.0%	3	10.0%	15	50.0%	24	80.0%	65.7%	94.3%	7	23.3%	3	10.0%	15	50.0%	25	83.3%	70.0%	96.7%
	NO	6	20.0%	0	0.0%	0	0.0%	6	20.0%	5.7%	34.3%	5	16.7%	0	0.0%	0	0.0%	5	16.7%	3.3%	30.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%	
C15	SI	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%	
C16	SI	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%	12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30	100.0%	100.0%	100.0%
	NO	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%	
C17	SI	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%					12		40.0%		12	40.0%					12		40.0%	
C18	SI	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%					12		40.0%		12	40.0%					12		40.0%	
C19	SI	8	26.7%	3	10.0%	13	43.3%	24	80.0%	65.7%	94.3%	10	33.3%	3	10.0%	14	46.7%	27	90.0%	79.3%	100.7%
	NO	4	13.3%	0	0.0%	2	6.7%	6	20.0%	5.7%	34.3%	2	6.7%	0	0.0%	1	3.3%	3	10.0%	-0.7%	20.7%
TOTAL		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%		12	40.0%	3	10.0%	15	50.0%	30		100.0%	
C20	SI			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%			3	10.0%	15	50.0%	18	60.0%	42.5%	77.5%
	NO			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%			0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%				3	10.0%	15	50.0%	18		60.0%	
C21	SI	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%					12		40.0%		12	40.0%					12		40.0%	
C22	SI	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%	12	40.0%					12	40.0%	22.5%	57.5%
	NO	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%	0	0.0%					0	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL		12	40.0%					12		40.0%		12	40.0%					12		40.0%	

Tras la evaluación del cumplimiento de los constraints de acuerdo con la estadificación correspondiente a bajo riesgo se observa que para el criterio C14 no hay la satisfacción de los límites de tolerancias establecidos por parte de 3 registros (10.0%) tanto para los planes originales como para los planes generados con el modelo 2, mientras que para los planes categorizados como riesgo intermedio se evidencia que no hay cumplimiento de C3 por 1 registro (3.3%) para los planes iniciales, mientras con el modelo 2 los 10 planes satisfacen el constraint, asimismo para C14 no hay satisfacción de 2 registros (6.7%) para



ambos planes de tratamiento en cuestión, respecto a C19 con los planes iniciales se tiene el incumplimiento por parte de 2 planes (6.7%) pero con el modelo 2 sólo se tiene el incumplimiento de 1 registro (3.3%). Por otro lado, para los planes con estadificación de alto riesgo, tienen las siguientes características, no hay cumplimiento de C10 por parte de 6 planes (20.0%) para los planes iniciales y el incumplimiento de 7 registros (23.3%) con el modelo 2, mientras para C19 no hay satisfacción de 2 planes (6.7%) para los planes originales y de 1 registro (3.3%) para los planes generados con el modelo 2.

Evaluación del cumplimiento de constraints categorizados por dosis, se inicia con el análisis para dosis de 6000 cGy (12 registros), se observa el incumplimiento de C3 por parte de un plan (3.3%) para el grupo de planes iniciales, para C14 no hay el cumplimiento del criterio por parte de 5 registros (16.7%) para ambos planes de tratamiento, además se evidencia que para C19 no hay satisfacción del límite de tolerancia por parte de 2 registros (6.7%) en los dos planes, además para C19 se tiene el incumplimiento de 1 registro para los planes generados con el modelo 2, también para C21 hay incumplimiento por parte de 1 registro de los planes del modelo 2. Asimismo, para la evaluación de los planes de tratamiento pertenecientes a la categoría de dosis de 6750 cGy (3 registros), se tiene el cumplimiento del total de los constraints. Finalmente, para la dosis de 7000 cGy (15 registros), para C10 6 de los planes originales (20.0%) no satisfacen el criterio, con el modelo 2 no se satisfacen 7 de estos (23.3%), además para C19 hay incumplimiento de 2 registros para los planes iniciales y de 1 registro para los planes generados con el modelo.

Análisis y discusión

Los planes clasificados como riesgo intermedio, tienen las siguientes características, de los registros para C3 un plan no cumple con los límites de tolerancia para el grupo de los planes iniciales, revisando los planes de tratamiento se evidencia que hay un solapamiento entre el bulbo peneano y el PTV1, por tanto; la curva de isodosis del 100% de la dosis de prescripción cubre en su totalidad el volumen de intersección, además el bulbo es una estructura pequeña, por tanto; el volumen que recibe dosis altas también es pequeño, al tratarse de un plan con dosis de 6000 cGy, se habla de que el constraint evalúa la dosis máxima que recibe el órgano, constituida por la dosis de prescripción, asimismo se irradia con dosis altas los cortes contiguos al término de la intersección, mientras que con el modelo se tiene la modulación del haz para que las multiláminas se cierren y puedan cubrir el órgano, en el mapa de las isodosis se evidencia que el modelo enfría la región en cuestión.

Por otro lado para los planes categorizados como alto riesgo se tiene el no cumplimiento por parte de uno de los registros para el modelo 2, respecto a C10, mientras que en el original cumple con el valor establecido, se observa que la dosis que cubre al PTV3 se distribuye de forma heterogénea, también se evidencia para los planes originales una reducción en el volumen que recibe la dosis de 5000 cGy, mientras que con el modelo 2 se entrega una dosis más homogénea y abarca mayor volumen, sin embargo; se debe tener en



cuenta que el intestino al ser un órgano móvil no se tiene la seguridad que durante el tratamiento la dosis se entregue en el mismo sitio.

La evaluación del cumplimiento de la cantidad de constraints conllevan a dar respuesta a la variable independiente denominada parámetros de planeación, tanto para los planes iniciales como los generados con el modelo se tiene el cumplimiento del 100.0% de los datos.

7.2.2.3 Puntuación planes de tratamiento

Para realizar el análisis de la calidad de los planes de tratamiento se genera un puntaje el cual se asigna a cada uno de los planes de acuerdo con la información obtenida en el DVH, en la Figura 24 se puede observar el análisis de los puntajes generados para los planes originales y los planes del modelo 2.

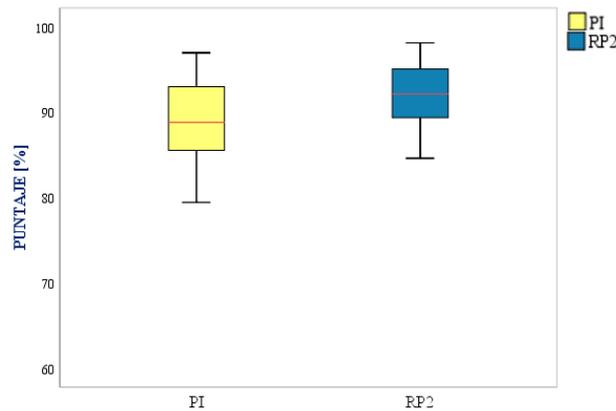


Figura 24.. Puntuación en porcentaje para los grupos de planes de tratamiento: plan inicial (amarillo) y RP V2.0 (azul)

En la Figura 24 se puede observar la puntuación de los planes de tratamiento representada por porcentajes para los dos grupos de planes de tratamiento, los planes iniciales son representados por una media de $88.9 \text{ DE}[5.2]\%$ con una puntuación mínima de 79.4% y una máxima de 97.0%, los planes generados por el modelo 2 están representados por una media de $92.2 \text{ DE}[4.1]\%$ con una puntuación mínima y máxima de 84.6% y 98.1% respectivamente.

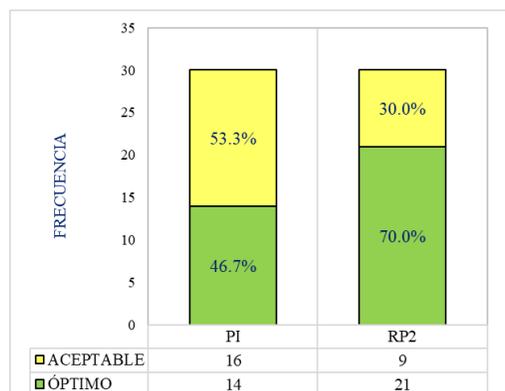


Figura 25.. Descripción de los planes de tratamiento por categorías (óptimo, aceptable e inaceptable)



Además, los planes fueron categorizados como óptimos o aceptables, la asignación de la respectiva categoría depende del puntaje global, en la Figura 25 se puede apreciar que con el modelo de planeación incrementa la cantidad de planes categorizados como óptimos en este caso son 7 planes que cambian de categoría (pasan de ser aceptables a óptimos) los cuales representan el 23.3% de los datos. Seguidamente se realiza la evaluación del puntaje de los planes de tratamiento categorizándolos por estadio y por dosis de prescripción.

Tabla 31.. Evaluación del puntaje de los planes de tratamiento categorizado por estadios y por dosis de prescripción

				PI				RP2			
PARÁMETROS		n	%	MED	DE	IC _{95%}		MED	DE	IC _{95%}	
				[%]	[%]	INF [%]	SUP [%]	[%]	[%]	INF [%]	SUP [%]
ESTADIO	BR	10	33.3%	89.7	3.0	88.5	92.8	91.4	3.5	89.4	94.5
	RI	10	33.3%	92.8	4.3	88.5	94.7	94.2	3.8	90.5	95.9
	AR	10	33.3%	84.1	4.8	80.9	87.7	91.6	3.8	88.7	94.1
TOTAL		30	100.0%								
DOSIS DE PRESCRIPCIÓN	6000 cGy	12	40.0%	90.6	4.0	88.0	93.1	91.6	3.5	89.4	93.9
	6750 cGy	3	10.0%	93.4	3.7	83.9	102.1	95.1	3.7	85.4	103.8
	7000 cGy	15	50.0%	86.4	5.4	83.7	89.6	92.2	3.8	90.0	94.2
TOTAL		30	100.0%								

Análisis y discusión

Tras la determinación del puntaje global para los planes de tratamiento se puede observar en la Figura 24 la distribución de los datos, donde la media incrementa para los planes generados con el modelo en 3.7% respecto a la media de los planes originales, también se puede observar que el rango intercuartílico es menor, por tanto, se reduce la variabilidad de la puntuación de los planes de tratamiento (mayor probabilidad de obtener puntajes altos). Por otra parte se realizó la categorización de los planes de tratamiento, obteniéndose el cambio de categoría de 7 planes de tratamiento (23.3%) de aceptables a óptimos, con esto se evidencia que hay un incremento en la función de puntuación para las métricas individuales y estas se ven reflejadas en el mejoramiento del puntaje global.

De la misma manera se realiza la evaluación del puntaje de los planes de tratamiento clasificándolos por riesgo y dosis de prescripción. Respecto a la puntuación por estadio se puede observar lo siguiente: los planes iniciales tienen medianas que difieren respecto a la del modelo 2, como lo es para bajo riesgo con incremento de 1.9%, riesgo intermedio en 1.5% y alto riesgo en 8.9%. Para los planes generados con el modelo de planeación la distribución de las medianas para los tres estadios tiene mayor semejanza, máxima diferencia de 3.1%, por lo cual, se puede inferir que los planes que genera el modelo de planeación tienen una reducción en la variabilidad y se alcanzan puntajes globales más altos respecto a los planes iniciales. Por otro lado, para la categorización por dosis de prescripción se puede observar que el modelo logra incrementar la mediana para las tres dosis de prescripción, con el modelo 2 se evidencia puntuaciones por encima del 90.0%.

En este apartado se evidencia que la mayoría de los planes de validación usados para evaluar el funcionamiento del modelo muestran resultados favorables respecto a la implementación de la planeación basada en el conocimiento, ya que, para el modelo 2 el



70.0% de los datos se clasifican como planes óptimos (puntuaciones $\geq 90.0\%$) a comparación de los planes iniciales con los cuales se clasificó el 46.7% de los registros como planes óptimos.

La evaluación de la variable independiente denominada como constraints para los dos grupos de planes (plan inicial y plan generado con el modelo 2) satisfacen el 100.0% de los datos.

Multivariado

Adicionalmente se realizó un análisis para determinar la influencia del tamaño del recto en la puntuación final de los planes de validación. La información fue consignada en la Tabla 32, para la clasificación del recto se tiene que si el volumen de la estructura es menor a la media de 50.6 cc (variables demográficas) se asigna a la categoría de pequeño, en caso contrario se asigna tamaño grande. De acuerdo con los resultados se evidencia que hay una asociación de riesgo no significativa entre el tamaño del recto y la categorización del puntaje, por ende, el volumen no es un factor de riesgo en la puntuación global tanto para los planes de tratamiento iniciales como los generados con el segundo modelo. De acuerdo con los valores de OR se observan que son mayores a 1, sin embargo, para que se consideren un factor de riesgo el IC no debe contener al 1, por tanto, se le asigna la no significancia.]98_

Tabla 32.. Análisis multivariado de la influencia del tamaño del recto en la puntuación final

PLAN	ESTRUCTURA		¿AFECTA EL VOL DEL RECTO EN EL PUNTAJE?		TOTAL	ODDS RATIO	IC _{95%}		TIPO DE ASOCIACIÓN
			ACEPTABLE	ÓPTIMO			INF	SUP	
PI	TAMAÑO DEL RECTO	GRANDE	8	4	12	2.5	0.5	11.4	NO SIGNIFICATIVA
			26.7%	13.3%	40.0%				
	PEQUEÑO	8	10	18					
			26.7%	33.3%	60.0%				
	TOTAL		53.3%	46.7%	100.0%				
RP2	TAMAÑO DEL RECTO	GRANDE	5	7	12	2.5	0.5	12.4	NO SIGNIFICATIVA
			16.7%	23.3%	40.0%				
	PEQUEÑO	4	14	18					
			13.3%	46.7%	60.0%				
	TOTAL		30.0%	70.0%	100.0%				

7.2.2.4 Índices de homogeneidad y conformidad:

A continuación, se muestra una representación gráfica de los datos sobre la evaluación del índice de homogeneidad y conformidad obtenidos para los planes de validación. Se puede observar que el índice de homogeneidad para los planes creados con el modelo disminuye su variabilidad, mientras que los planes elaborados manualmente tienen una distribución más amplia. Adicionalmente, la media se aleja del valor óptimo de dicho índice, como se puede observar en la Figura 26. Se evidencia que para el PTV3 el índice de homogeneidad es más alto indicando que la dosis dentro del PTV contiene heterogeneidades, o cambios de dosis más frecuente. Por otro lado, PTV2 es el volumen objetivo con mayor homogeneidad, el cual puede estar influenciado con la cercanía a la próstata, la cual tiene prescrito la dosis más alta, por lo tanto, se tiene la contribución de esta dosis a las vesículas, y adicionalmente se tiene un volumen menor y es más probable que sea cubierto casi en su totalidad.

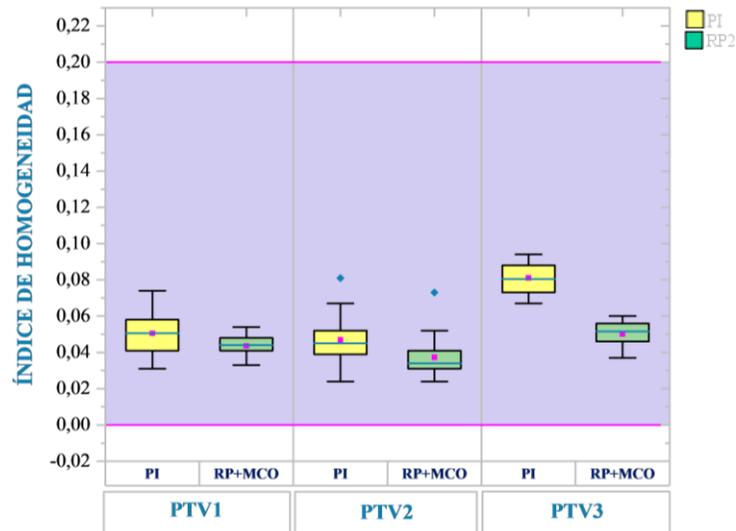


Figura 26.. Representación del índice de homogeneidad para cada uno de los PTV's para los dos grupos de planes de tratamiento dentro de la franja de tolerancia (0 y 0.2)

En la Figura 27 se puede observar la distribución de los datos para el índice de conformidad, para PTV1 con los planes iniciales se tiene una mediana de 0.969 $DE[0.071]$ y para los planes con el modelo es de 0.966 $DE[0.009]$, respecto a PTV2 la representación de la mediana para los planes iniciales es de 0.983 $DE[0.107]$ y para los del modelo de 0.984 $DE[0.019]$, mientras para el PTV3 la mediana es de 0.957 $DE[0.147]$ y 0.971 $DE[0.012]$ para los planes originales y los planes del modelo respectivamente. Así también, dentro de la gráfica se define la franja de tolerancia, la cual toma los valores definidos en la Tabla 14, en la sección de calidad de planeación.

Seguidamente se muestra gráficamente el comportamiento del índice de conformidad para cada uno de los PTV's

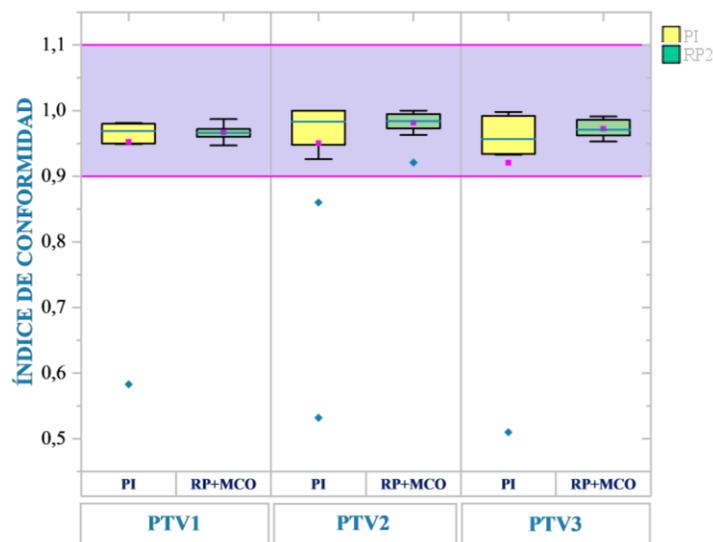


Figura 27.. Representación del índice de conformidad para cada uno de los PTV's para los dos grupos de planes de tratamiento dentro de la franja de tolerancia (0.9 y 1.1)



Al observar el comportamiento del índice de conformidad en la Figura 27 se evidencia que algunos planes de tratamiento no cumplen con los límites establecidos. Sin embargo, al observar los datos, se puede apreciar que uno de los planes de tratamiento no cumple con el índice de conformidad para los 3 PTV's, considerando que se trata de un paciente con estadificación de alto riesgo, mientras para el índice de conformidad de PTV2 1 registro no cumple con las condiciones establecidas, este se trata de un plan de tratamiento con estadificación de riesgo intermedio, en este caso se tienen 2 targets y solo uno de los dos (vesículas seminales) no se encuentra dentro de la clasificación de cumplimiento de dichos criterios. Por tanto, 28 de los registros (93.3%) satisfacen los intervalos para el índice de conformidad.

Análisis y discusión

En la Figura 26 se observa la información correspondiente a la evaluación de índice de homogeneidad, para PTV1 se tiene una mediana de 0.051 *DE*[0.011] y 0.044 *DE*[0.006] para los planes iniciales y los generados por el modelo 2 respectivamente, por tanto, se presenta una reducción de la mediana del 13.7% y a la vez disminución de la variabilidad con el 58.8%, mientras que para PTV2 los datos son representados por una mediana de 0.045 *DE*[0.013] para los planes originales y por 0.034 *DE*[0.011] para los planes realizados con el modelo 2, por ende, se tiene una mejoría en el índice de homogeneidad para este target en 24.4% y en el rango intercuartílico de 23.1%, respecto a PTV3 los planes iniciales son representados por una mediana de 0.081 *DE*[0.009] y con el modelo la mediana es de 0.052 *DE*[0.007], por tanto, se presenta una reducción importante en la mediana representada por el 35.8% y la variabilidad de los datos disminuye en 25.0%. La reducción tanto de la mediana como de los rangos intercuartílicos indica que las curvas de isodosis que cubren a los PTV poseen mayor uniformidad para los planes generados con los modelos. Asimismo, dentro de la gráfica se define una franja la cual constituye los límites de tolerancia establecidos para el índice de homogeneidad, se evidencia que la totalidad de los planes de tratamiento se encuentran dentro de los límites permisibles.

Respecto al estudio del índice de homogeneidad se puede evidenciar que en ambos planes de tratamiento se tiene el cumplimiento de este criterio para todos los planes en cuestión, cabe aclarar que con el modelo 2 es más factible satisfacer el intervalo establecido, ya que, sus datos tienen menor variabilidad (disminución de la mediana y de la dispersión) y se aproximan a alcanzar el valor óptimo de $IH = 0$, como se establece en el ICRU 83 [29].

De acuerdo con los resultados obtenidos para la evaluación del índice de conformidad se puede evidenciar que hay un incremento en la mediana de los datos, con respecto a PTV1 se presenta un detrimento de 0.3% y el rango intercuartílico disminuye en 56.7% en relación con los planes iniciales, mientras tanto para PTV2 hay un leve aumento en la mediana en 0.1% y reducción en la variabilidad de 57.7% y finalmente para PTV3 se tiene mejoría en la mediana del 1.5%, además de la disminución del rango intercuartílico de 57.6%. Mientras que la reducción de la mediana para estos casos muestra que las curvas de isodosis se ajustan mejor al volumen blanco y a la vez se reduce la dosis a los OAR's más cercanos al PTV,



adicionalmente, la reducción en los rangos intercuartílicos muestra una disminución de la dependencia de la experiencia en la planeación de tratamientos.

Dentro de los resultados del índice de conformidad se puede observar que los datos presentan una menor variabilidad representada por los rangos intercuartílicos estrechos, asimismo la mediana del PTV3 incrementa para los planes del modelo aproximándose más al valor óptimo, no obstante dentro de la estadística hay un dato influyente en la distribución, ya que, se puede observar que la media se desplaza en dirección opuesta al valor óptimo ($IC = 1$) para los planes iniciales, debido a la lejanía a la que se encuentra dicho valor respecto a la mayoría de los datos. Este registro cumple con los límites de tolerancia establecidos para el cubrimiento de los PTV's, sin embargo; dichos valores están muy aproximados a los valores mínimos aceptables para los targets y la mayoría de los planes de tratamiento cumplen con la condición de que el 95% del volumen sea cubierto con la dosis de prescripción del 100%, siendo más notorio en el PTV3, donde la media se desplaza aún más del rango intercuartílico. Sin embargo; haciendo un análisis individual del plan se observa lo siguiente, el plan tiene un cumplimiento de $D95\% \approx 95\%$ y el volumen que recibe la dosis del 100% es reducido, por tanto; no satisface el intervalo aceptable establecido para dicho índice.

Con los datos obtenidos en esta sección se da respuesta a las variables independientes: índice de homogeneidad se tiene un cumplimiento para el 100.0% de los datos para los dos planes de tratamiento, mientras para el índice de conformidad para el grupo de planes iniciales no hay cumplimiento por parte del 6.7% de los datos, finalmente para los planes generados con el modelo se tiene la satisfacción del 100.0% de los datos.

7.2.2.5 Índice gamma

En esta sección el análisis del índice gamma se realiza considerando todos los casos, 30 registros usados para la validación del modelo, estos son representados por una media de $57.4 DE [5.4] \%$, valores mínimos y máximos de 44.9 % y 69.2% respectivamente, como se muestra en la Figura 28.

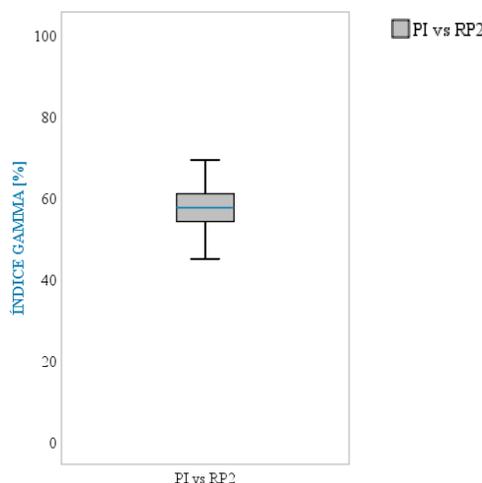


Figura 28.. Representación índice gamma PI vs RP+MCO planes de validación



En la Figura 29 se puede observar la representación de cada uno de los estadios para el cáncer de próstata, como son: bajo riesgo con una media de 57.8 $DE[4.5]$ %, mínimo porcentual de 46.4 % y un máximo de 62.2 %, por otra parte, para riesgo intermedio los datos son representados por una media de 60.8 $DE[5.1]$ %, con un valor mínimo de 54.0 % y máximo de 69.2 %, finalmente para la estadificación de alto riesgo se tiene una media de 53.7 $DE[4.5]$ % valor mínimo y máximo de 44.9 % y 62.6 % respectivamente.

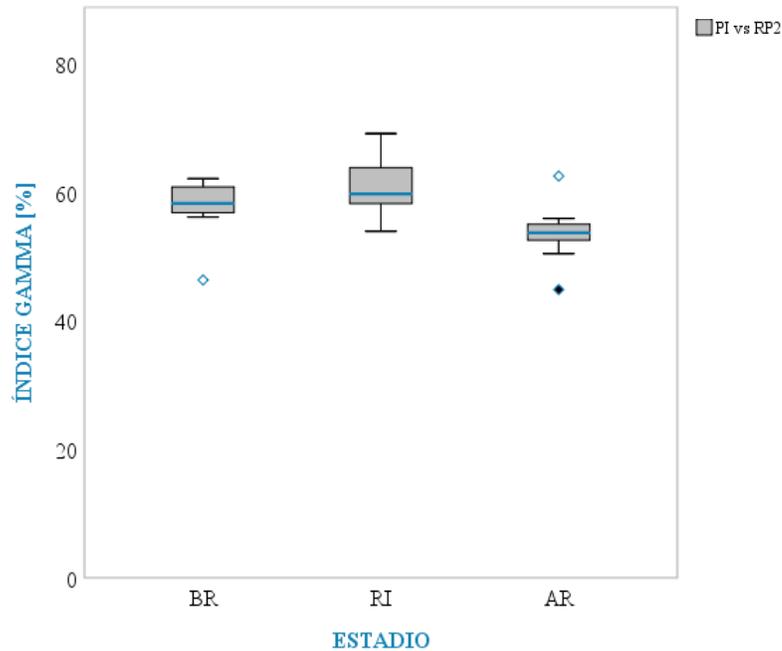


Figura 29.. Representación índice gamma PI vs RP+MCO por estadios para planes de validación

Análisis y resultados:

Respecto a la diferencia del índice gamma de 42.6% generada para los planes iniciales respecto a los planes realizados con el segundo modelo, como se muestra en la Figura 28, se puede observar que muestran diferencias apreciables en la calidad del plan de tratamiento, puesto que, el modelo logra reproducir planes con diferente información dosimétrica y modulación de haz distinta, esto se ve reflejado en el valor de diferencia del índice gamma.

Conforme a la Figura 29 se evidencia algunas diferencias en el índice gamma respecto a la estadificación, de donde se observa que para bajo riesgo los datos se encuentran distribuidos en un rango pequeño y a su vez se puede observar que la media se encuentra alrededor del 58.0%, el cual al realizar la respectiva relación entre el plan inicial y el plan generado por el modelo se tienen grandes diferencias del 42.2%, se ve reflejado en la dosis a punto (mayor presencia de puntos fríos). Mientras que para riesgo intermedio el rango en cual se encuentran distribuidos los datos es más amplio y estos tienen diferencias del 37.8%. No obstante, para alto riesgo los datos están más concentrados dentro de un rango pequeño (menor variabilidad) y se tienen datos atípicos tanto para valores mínimos como máximos,



el valor más alejado del primer cuartil representa una diferencia notoria entre el plan inicial y el plan del modelo final, por tanto, se puede inferir que los planes mejoran considerando que se administra una dosis más homogénea y la diferencia del índice gamma es más grande. Sin embargo, no hay un límite establecido como el mínimo aceptable, pero entre mayor sea la diferencia de dicho índice mayor es la diferencia de modulación del haz.

7.3 DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL PLAN DE TRATAMIENTO

La evaluación de cada una de las variables de calidad de planeación conlleva a determinar la variable dependiente, la cual determina la calidad del plan de tratamiento. Se busca observar si se logran obtener mejores o iguales indicadores de calidad para los planes generados con el modelo basado en el conocimiento respecto al plan original. Para la determinación de dicha variable se tiene en cuenta el resultado de la evaluación de los planes a través del puntaje, la cantidad de constraints cumplidos hacen parte de este análisis, adicionalmente se usa la información respecto a la evaluación de los índices de homogeneidad y conformidad, finalmente se determina el índice gamma y su asociación de cumplimiento o no con los límites establecidos como aceptables.

7.3.1 Evaluación de la calidad de los planes de verificación

Inicialmente se planteó revisar la calidad de los planes para los registros usados en el entrenamiento y en la posterior verificación de los modelos, por medio de la variable definida como calidad del plan, evaluando 4 de 5 de los criterios establecidos en la Tabla 14 usados para definir esta misma, en este análisis no se tiene en consideración el índice gamma y se obtienen los siguientes resultados para la evaluación de los criterios restantes (4):



Figura 30.. Cantidad de cumplimiento de criterios de calidad planes de verificación (PI, RP V1.0 y RP V2.0)



En la Figura 30 se puede observar la cantidad de cumplimiento de criterios de calidad. Con la finalidad de determinar la calidad del plan, inicialmente se realiza la evaluación para los planes de tratamiento usados en el entrenamiento del modelo (140 registros), se evidencia que se generan dos categorías, una de la cuales considera los planes que cumplen con 3 criterios de calidad (roja) y la otra relaciona la cantidad de planes de tratamiento que cumplen con 4 criterios de calidad (verde), de donde se puede observar que para los planes originales 10 planes cumplen con 3 criterios de calidad representado el 7.1%, mientras los 130 planes restantes satisfacen 4 de los criterios establecidos. Seguidamente en la evaluación de los criterios de calidad para los planes generados con el modelo 1, se puede evidenciar que 3 de los registros satisfacen 3 criterios de calidad con una representación del 2.1%, por otro lado, los 137 planes restantes cumplen con 4 de los indicadores de calidad. Finalmente para los planes generados con el modelo de planeación 2 se observa que se reproducen los mismos datos obtenidos con el modelo 1.

A continuación, se realiza la respectiva clasificación de cumplimiento o no (representada a través de “SI” o “NO”) de la variable dependiente de calidad del plan, como sigue:

Para los pacientes usados en el entrenamiento de los modelos se tiene que el cumplimiento con el indicador de calidad se genera al satisfacer 4 criterios de calidad de planeación, de lo contrario se determina que los planes no cumplen con los indicadores de alta calidad. De acuerdo con la información consignada en la Figura 30 se puede apreciar que 130 planes satisfacen los criterios de alta calidad para los planes originales y 137 con ambos modelos.

De acuerdo con los planes que no logran obtener los criterios suficientes (4) para clasificarlos como de alta calidad, se tienen las siguientes observaciones, respecto a los planes iniciales los 10 registros están constituidos por: 7 planes de alto riesgo (7000 cGy), 2 de riesgo intermedio (6000 cGy) y 1 de bajo riesgo (6000 cGy), se evidencia que para 6 registros no hay cumplimiento de la cantidad de constraints, 2 de los registros tienen solapamiento entre el PTV y el bulbo, por lo tanto no hay cumplimiento en los constraints de este órgano, además se tratan de planes de alto riesgo y no tienen satisfacción del límite de tolerancia para el intestino delgado, 1 registro también posee intersección entre el bulbo y el PTV, además de no cumplir con el porcentaje de volumen tolerable que recibe la dosis de 6000 cGy, los 2 registros restantes no satisfacen los valores del intestino, además la dosis de 4000 cGy logra abarcar un volumen superior al establecido, adicionalmente no hay satisfacción de los límites para la vejiga (C19 y C20), el último registro no satisface 3 constraints, 2 pertenecientes a la vejiga y el otro al recto. Mientras los 4 registros restantes no cumplen con los intervalos del índice de conformidad.

Para los planes generados con los modelos de planeación se observa lo siguiente, los tres planes en cuestión no satisfacen con la cantidad de cumplimiento de constraints, 2 de los registros se clasifican con estadificación de alto riesgo y un registro de bajo riesgo. Respecto a los 2 registros que no se clasifican como planes de alta calidad para los planes originales se evidencia que estos se mantienen en la misma categoría para los planes generados con los



modelos, mientras el otro registro no tiene cumplimiento para el criterio del intestino delgado, el volumen del recto que recibe la dosis de 7000 cGy es más grande del permitido, mientras para la vejiga el porcentaje de volumen que recibe la dosis de 6500 cGy es superior al establecido como límite.

7.3.2 Evaluación de la calidad de los planes de validación

Finalmente, para la evaluación de la calidad de los planes de validación se consideran las 5 variables independientes para determinar la variable dependiente. A continuación, se muestran los datos obtenidos en el análisis realizado:

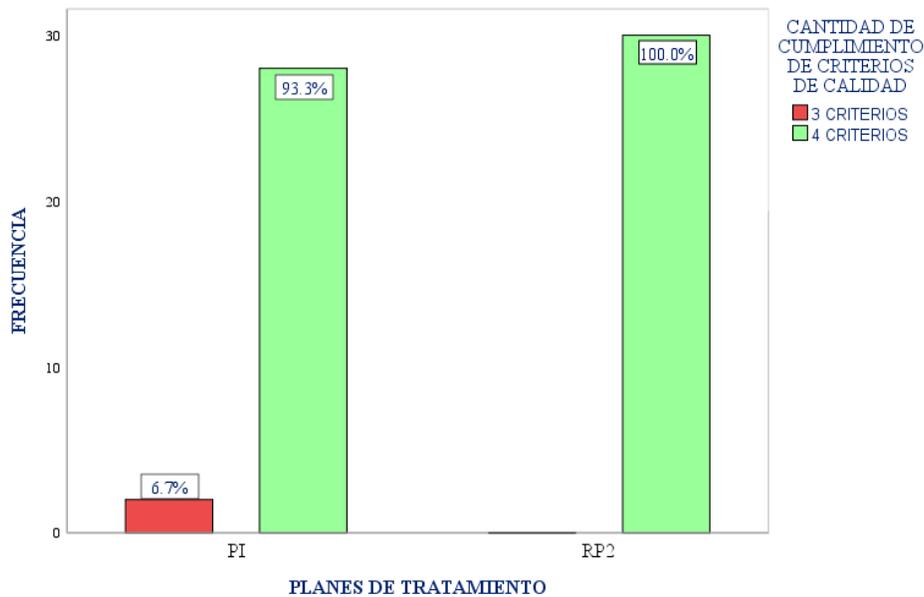


Figura 31.. Cantidad de cumplimiento de criterios de calidad planes de validación (PI y RP V2.0)

En primer lugar, se evalúan cada una de las variables independientes para luego darles la clasificación de cumplimiento o no cumplimiento con los parámetros establecidos. Por lo tanto, se puede observar para los planes iniciales que 2 registros satisfacen 3 de los 5 criterios de calidad (roja), representando el 6.7%, y 28 de los registros restantes satisfacen 4 criterios (verde), que representan el 93.3%. Finalmente 30 planes generados con el modelo final cumplen con 4 de los 5 criterios establecidos para determinar la calidad de los planes, representando el cumplimiento del 100.0%.

Posteriormente se procede a determinar si la variable dependiente: calidad del plan satisface la condición de cumplimiento con 4 de los 5 criterios para categorizarla como cumplimiento con el criterio, para finalmente asignarle “SI” de lo contrario un “NO”.

En la Figura 31 se puede observar para los planes de tratamiento originales que 2 de los registros no cumplen con la variable de calidad representando el 6.7% de no satisfacción, mientras los 28 registros restantes satisfacen el criterio de calidad, estos constituyen el 93.3% de los planes. Asimismo, la evaluación de la calidad de los planes de tratamiento generados



con el modelo de planeación basado en el conocimiento resalta que todos los planes cumplieron las especificaciones de calidad; por tanto, se puede decir que el 100% de los registros entran en la categoría de alta calidad de planeación, el modelo logró resolver la quinceava parte que el plan inicial no logro.

Análisis y discusión

- La calidad de los planes se definió mediante la evaluación de las variables independientes de forma cualitativa como se indica en la Tabla 14, en la sección de calidad de planeación.
- La descripción de la calidad de los planes se ejecutó en dos apartados, el primero relaciona la evaluación de los planes de verificación y el segundo los planes de validación. Para el primer grupo se observó que los planes de tratamiento iniciales lograron categorizar el 92.9% de los registros como planes con cumplimiento de los criterios de alta calidad, mientras con los modelos se logra un cumplimiento del 97.9% de los planes. Donde se logra evidenciar que los modelos de planeación basados en el conocimiento mejoraron los indicadores de calidad respecto a los planes de tratamiento originales.
- La evaluación de la calidad de los planes de validación se realizó gracias a la determinación del cumplimiento de la totalidad de los indicadores, ya que, estos representan alta calidad de los planes, de donde se observa que para los planes generados con los modelos el 100% de los registros cumplen con dicha condición, mientras tanto para los planes iniciales se tiene un cumplimiento del criterio del 93.3% de la muestra. Con estos resultados se da indicios de que los planes generados con los modelos logran reproducir planes con altos estándares de calidad.
- Los dos planes que no logran estar dentro de la categoría de alta calidad para el grupo de planes de validación poseen las siguientes características: los dos planes no cumplen con el intervalo de tolerancia del índice de conformidad, el primer registro se trata de un paciente de riesgo intermedio y el segundo paciente de alto riesgo, como se pueden evidenciar en el análisis del cumplimiento del índice de homogeneidad. Por tanto, no logran alcanzar la cantidad de criterios necesarios para categorizarlos como planes de alta calidad, puesto que, al no cumplir con el índice de conformidad se infiere que hay mayor dosificación de los OAR's para estos pacientes.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en esta sección se observa que el modelo de planeación basado en el conocimiento logro mejorar significativamente la calidad de los planes clínicos y la reducción de la dosis para la mayoría de los órganos en riesgo, en un menor tiempo posible y logra reducir la dependencia con la habilidad de planificación, por tanto; RapidPlan es una herramienta efectiva en la práctica clínica, con lo cual se ratifica la información suministrada en las diferentes fuentes bibliográficas. [6],[72],[74]

Conforme a los resultados obtenidos con el modelo inicial se evidencia que se logra generar planes con alta calidad. Por lo tanto, el modelo fue un factor para prevenir usuarios que en su inicio se incurrieron en la elaboración de planes de tratamiento.



8 CONCLUSIONES

- I. Respecto a la población de estudio se observó que la media de la edad de los pacientes de cáncer de próstata es de 68 DE[7] años, además, se puede observar que los pacientes que inician tratamiento de radioterapia con mayor frecuencia se sitúan en el rango de edad de 55 a 85 años, donde se concentra el 97.1% de los datos, por tanto; estos resultados están acorde con los informes presentados por el Ministerio de Salud de Colombia.
- II. Al realizar el entrenamiento del modelo con la información de los diferentes registros de planes de tratamiento administrados con anterioridad, el software genera una estadística con que se pueden realizar las respectivas comparaciones de las estructuras volumétricas de los nuevos pacientes. Con estos indicadores se puede guiar y determinar si la anatomía del nuevo paciente tiene características similares a la de los registros con las que se entrenó el modelo. Por tanto, la eficiencia de este depende de las características geométricas del paciente.
- III. Con los resultados obtenidos en el estudio se puede evidenciar que los dos modelos generan planes de tratamiento de alta calidad. No obstante, el modelo final, que fue entrenado con los planes mejorados mediante MCO, destaca por su capacidad de explorar más soluciones posibles para los objetivos. Este enfoque conlleva a mejorar algunos criterios y a la vez se puede tener un detrimento para otros. Esto se ve reflejado en los resultados obtenidos con dicho modelo (reducción de los rangos de estimación de DVH en comparación con el primer modelo), ya que, en la mayoría de los casos los constraints satisfacen los criterios con mejoras respecto al plan original y a los planes generados con el primer modelo.
- IV. La implementación de un modelo de planeación basado en el conocimiento contribuye en la reducción de la variabilidad de planeación como se pudo observar en la evaluación tanto de los constraints como de los índices de homogeneidad y conformidad. La dispersión entre los datos se reduce (los valores tienden a aproximarse a los criterios óptimos, $IC = 1$ e $IH = 0$ establecidos en el ICRU 83) para los planes elaborados con el modelo final en comparación con los resultados presentados por los planes originales.
- V. Al comparar los constraints usados para la evaluación de los planes de tratamiento se puede observar una disminución de la dosis más frecuentemente para el bulbo peneano, las cabezas femorales y en menor medida para la vejiga, el intestino y la médula. Sin embargo, se puede apreciar que para el recto hay un pequeño incremento en los valores límites de los constraints para dosis altas, pero finalmente, al hacer la evaluación del plan completo (puntuación global) se puede inferir que el modelo de planeación mejora en cierta medida la calidad del plan de tratamiento original y en la etapa de validación se muestra un incremento del 3.7%.
- VI. Una alternativa para categorizar o clasificar la calidad de un plan de tratamiento es generar un puntaje final o global, que está constituido por la contribución de cada uno de los constraints que se estén evaluando (métricas). En el estudio se pudo evidenciar



que la implementación de esta puntuación contribuyó a la construcción de una categorización cualitativa con el cual se clasificaron los planes como óptimos, aceptables y no aceptables, permitiendo tener un panorama más claro y general para cada uno de los planes en estudio. Con esta herramienta se logró observar que con el uso de los modelos de planeación se disminuyó la cantidad de planes aceptables presentes en los registros iniciales, en la etapa de validación 7 planes (23.3%) cambiaron de categoría de aceptables a planes óptimos, dando indicios de que el modelo final mejoró los constraints en la mayoría de los casos.

- VII. La calidad de un plan de tratamiento puede ser determinada mediante la evaluación de varios parámetros, en el presente estudio se realizó a través de la valoración de los límites de tolerancia, cantidad de cumplimiento de constrains, índice de homogeneidad, índice de conformidad e índice gamma. Todos estos criterios contribuyeron a determinar si la calidad de los planes generados con los modelos mejora el indicador respecto a los planes originales. De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que los modelos de planeación logran reproducir planes de tratamiento con altos estándares de calidad, para el grupo de planes de validación se tiene la clasificación de alta calidad para la totalidad de los registros.
- VIII. Si bien el entrenamiento de un modelo de planeación requiere de inversión de recursos y de tiempo, se tiene como resultado una herramienta lo suficientemente sofisticada para realizar planes de tratamiento de alta calidad, mientras la base de datos sea alimentada con planes buenos. Además, con la estimación de los rangos de DVH para los OAR's, se contribuye a la reducción de la variabilidad entre planificadores, disminuyendo la dependencia de la experticia de los usuarios. Adicionalmente, la planeación basada en el conocimiento contribuye en la estandarización del contorneado de los órganos en riesgo, ya que, este funciona eficientemente con características geométricas similares con las que el modelo fue entrenado.
- IX. De acuerdo con los resultados obtenidos en la implementación del modelo de planeación para cáncer de próstata se puede concluir que los planes de tratamiento con los que se alimentó la base de datos son de buena calidad y por tanto el modelo genera planes con buenos indicadores de calidad en menor tiempo, por ende; se puede continuar con el entrenamiento de otros modelos basados en el conocimiento para diferentes regiones anatómicas.



9 REFERENCIAS

- [1] “Cáncer.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- [2] “Minsalud se unió a conmemoración del Día Mundial contra el Cáncer.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-se-unio-a-conmemoraci%C3%B3n-del-Dia-Mundial-contra-el-Cancer.aspx>
- [3] “Cáncer de próstata.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/salud/publica/ssr/Paginas/Cancer-de-prostata.aspx>
- [4] “Páginas - Incidencia cáncer de próstata en Colombia.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.sispro.gov.co/observatorios/oncancer/indicadores/Paginas/C%c3%a1ncer-de-pr%c3%b3stata.aspx>
- [5] A. Poitevin-Chacón and A. Poitevin-Chacón, “La radioterapia, el arma invisible contra el cáncer,” *Gaceta mexicana de oncología*, vol. 20, no. 3, pp. 84–86, Sep. 2021, doi: 10.24875/J.GAMO.M21000212.
- [6] K. Kubo *et al.*, “Dosimetric comparison of RapidPlan and manually optimized plans in volumetric modulated arc therapy for prostate cancer,” *Physica Medica*, vol. 44, pp. 199–204, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.EJMP.2017.06.026.
- [7] W. M. Hung, N. T. C. Fung, A. T. Y. Chang, M. C. H. Lee, and W. T. Ng, “Knowledge-based planning in nasopharyngeal carcinoma,” *Annals of Nasopharynx Cancer*, vol. 4, no. 0, pp. 6–6, Aug. 2020, doi: 10.21037/ANPC-20-12.
- [8] P. Xia *et al.*, “STRATEGIES FOR RADIATION THERAPY TREATMENT PLANNING.” [Online]. Available: www.springerpub.com
- [9] M. Pérez, “III Jornadas RSEF / IFIMED de Física Médica Primary author(s)”, [Online]. Available: <https://indico.ific.uv.es/event/5983/contributions/13918/contribution.pdf>
- [10] K. Teichert *et al.*, “Targeted multi-criteria optimisation in IMRT planning supplemented by knowledge based model creation,” *Oper Res Health Care*, vol. 23, p. 100185, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ORHC.2019.04.003.
- [11] C. Wang, X. Zhu, J. C. Hong, and D. Zheng, “Artificial Intelligence in Radiotherapy Treatment Planning: Present and Future,” *Technol Cancer Res Treat*, vol. 18, Jan. 2019, doi: 10.1177/1533033819873922.
- [12] A. Fogliata *et al.*, “RapidPlan head and neck model: The objectives and possible clinical benefit,” *Radiation Oncology*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2017, doi: 10.1186/S13014-017-0808-X/FIGURES/3.
- [13] K. Kubo *et al.*, “Dosimetric comparison of RapidPlan and manually optimized plans in volumetric modulated arc therapy for prostate cancer,” *Phys Med*, vol. 44, pp. 199–204, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.EJMP.2017.06.026.
- [14] K. van Gysen *et al.*, “Rolling out RapidPlan: What we’ve learnt,” *J Med Radiat Sci*, vol. 67, no. 4, pp. 310–317, Dec. 2020, doi: 10.1002/JMRS.420.
- [15] “Multicriteria Optimization.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://gray.mgh.harvard.edu/research/optimization/39-multicriteria-optimization>
- [16] C. Harrer, W. Ullrich, and J. J. Wilkens, “Prediction of multi-criteria optimization (MCO) parameter efficiency in volumetric modulated arc therapy (VMAT) treatment planning using machine learning (ML),” *Physica Medica*, vol. 81, pp. 102–113, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.EJMP.2020.12.004.
- [17] “Multi-Criteria Optimization: Creating High-Quality Treatment Plans in a Fraction of the Time | Varian.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.varian.com/es-xl/node/4277>
- [18] “Varian Medical Systems Expands Clinicians’ Cancer-fighting Toolkit With Eclipse 15.5 | BioSpace.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.biospace.com/article/releases/varian-medical-systems-expands-clinicians-cancer-fighting-toolkit-with-eclipse-15-5/>
- [19] E. Miguel-Chumacero, G. Currie, A. Johnston, and S. Currie, “Effectiveness of Multi-Criteria Optimization-based Trade-Off exploration in combination with RapidPlan for head & neck radiotherapy planning,” *Radiation Oncology*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, Nov. 2018, doi: 10.1186/S13014-018-1175-Y/TABLES/7.



- [20] E. Miguel-Chumacero, M. Anderson, and S. Currie, “(“):108. The Lancet Oncology,” *Radiation Oncology*, vol. 120, no. 3, pp. 1047–60, 2016, doi: 10.3252/pso.eu.ESTRO37.2018.
- [21] A. Poitevin-Chacón and A. Poitevin-Chacón, “La radioterapia, el arma invisible contra el cáncer,” *Gaceta mexicana de oncología*, vol. 20, no. 3, pp. 84–86, Sep. 2021, doi: 10.24875/J.GAMO.M21000212.
- [22] “12_Defining target volumes and organs at risk”, Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: https://humanhealth.iaea.org/HHW/RadiationOncology/Treatingpatients/Treatment_planning_and_techniques/Training_Course/12_Defining_target_volumes_and_organs_at_risk.pdf
- [23] “Cancer de próstata: Estadios y Grados | Cancer.Net.” Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.cancer.net/es/tipos-de-cancer/cancer-de-prostata/estadios-y-grados>
- [24] “Cáncer de próstata | Argentina.gob.ar.” Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/salud/cancer/tipos/cancer-de-prostata>
- [25] “Actualización sobre cáncer de próstata.” Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1560-43812017000300021
- [26] “Tratamiento del cáncer de próstata (PDQ®)–Versión para pacientes - NCI.” Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/espanol/tipos/prostata/paciente/tratamiento-prostata-pdq>
- [27] N. Hodapp, “[The ICRU Report 83: prescribing, recording and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)],” *Strahlenther Onkol*, vol. 188, no. 1, pp. 97–99, Jan. 2012, doi: 10.1007/S00066-011-0015-X.
- [28] A. Carbuccia *et al.*, “Volumenes blanco en radioterapia conformada 3D,” Impreso en España.
- [29] P. M. García Corzo Dir Jose Manuel Udías Moineo, “Optimización Evolutiva Multiobjetivo para Planificación de Tratamiento en Radioterapia.”
- [30] J.-C. Rosenwald, “TABLE M.1 Physical Constants and Usefull Data,” *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice*, pp. 1305–1307, 2007.
- [31] “Histograma Dosis-Volumen (DVH) - Cálculo de dosis en braquiterapia ginecológica HDR-3D mediante.” Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available: <https://1library.co/article/histograma-dosis-volumen-c%C3%A1lculo-dosis-braquiterapia-ginecol%C3%B3gica-mediante.qok2go7y>
- [32] F. De Ciencias *et al.*, “Universidad Central De Venezuela PLANIFICACIÓN DE TRATAMIENTO PARA RADIOTERAPIA A PROFUNDIDADES MAYORES A 40 CM, MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS DE RADIOTERAPIA CONFORMADA EN 3D Y RADIOTERAPIA DE INTENSIDAD MODULADA (IMRT)”.
- [33] F. Cerdán, *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VERIFICACIÓN DE TRATAMIENTOS EN RADIOTERAPIA CON MODULACIÓN DE INTENSIDAD*. GRISO, 2011.
- [34] A. Fogliata, G. Nicolini, A. Clivio, E. Vanetti, and L. Cozzi, “Dosimetric evaluation of Acuros XB Advanced Dose Calculation algorithm in heterogeneous media,” *Radiation Oncology*, vol. 6, no. 1, pp. 1–15, Jul. 2011, doi: 10.1186/1748-717X-6-82/TABLES/2.
- [35] T. Ito *et al.*, “Dose difference between anisotropic analytical algorithm (AAA) and Acuros XB (AXB) caused by target’s air content for volumetric modulated arc therapy of head and neck cancer,” *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, vol. 28, no. 3, p. 399, 2023, doi: 10.5603/RPOR.A2023.0032.
- [36] A. V soLA, “RADIOTERAPIA DE INTENSIDAD MODULADA (IMRT) INTENSIDADy modulATIOn RADIATIOn THERAPy (ImRT),” 2011.
- [37] G. Tejpal, A. JaiPrakash, B. Susovan, S. Ghosh-Laskar, V. Murthy, and A. Budrukkar, “IMRT and IGRT in head and neck cancer: Have we delivered what we promised?,” *Indian J Surg Oncol*, vol. 1, no. 2, pp. 166–185, Apr. 2010, doi: 10.1007/S13193-010-0030-X.
- [38] J. F. Ávila-Tomás, M. A. Mayer-Pujadas, and V. J. Quesada-Varela, “La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina II: importancia actual y aplicaciones prácticas,” *Aten Primaria*, vol. 53, no. 1, pp. 81–88, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.APRIM.2020.04.014.
- [39] M. Álvarez Vega, L. M. Quirós Mora, and M. V. Cortés Badilla, “Inteligencia artificial y aprendizaje automático en medicina,” *Revista Medica Sinergia*, vol. 5, no. 8, p. e557, Aug. 2020, doi: 10.31434/rms.v5i8.557.



- [42] M. Hussein, B. J. M. Heijmen, D. Verellen, and A. Nisbet, "Automation in intensity modulated radiotherapy treatment planning-a review of recent innovations," *British Journal of Radiology*, vol. 91, no. 1092, Sep. 2018, doi: 10.1259/BJR.20180270/ASSET/IMAGES/LARGE/BJR.20180270.G004.JPEG.
- [43] J. P. Tol, A. R. Delaney, M. Dahele, B. J. Slotman, and W. F. A. R. Verbakel, "Evaluation of a Knowledge-Based Planning Solution for Head and Neck Cancer," *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*, vol. 91, no. 3, pp. 612–620, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.ijrobp.2014.11.014.
- [44] J. De Areba Iglesias, G. R. Martín, Z. Aza Villarrubia, V. Álvarez Sánchez, D. Flavio, and M. Barrio, "Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide," *J Appl Clin Med Phys*, vol. 14, no. 6, p. 170, 2013.
- [45] A. R. Delaney *et al.*, "Evaluation of an Automated Proton Planning Solution," *Cureus*, vol. 10, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.7759/CUREUS.3696.
- [46] J. P. Tol, M. Dahele, A. R. Delaney, B. J. Slotman, and W. F. A. R. Verbakel, "Can knowledge-based DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans?," *Radiation Oncology*, vol. 10, no. 1, pp. 1–14, Nov. 2015, doi: 10.1186/S13014-015-0542-1/FIGURES/9.
- [47] V. Medical Systems, "RP201 RapidPlan 16.1 Implementation," 2019.
- [48] S. Ghandour, O. Matzinger, and M. Pachoud, "Volumetric-modulated arc therapy planning using multicriteria optimization for localized prostate cancer," *J Appl Clin Med Phys*, vol. 16, no. 3, pp. 258–269, May 2015, doi: 10.1120/JACMP.V16I3.5410.
- [49] E. Miguel-Chumacero, G. Currie, A. Johnston, and S. Currie, "Effectiveness of Multi-Criteria Optimization-based Trade-Off exploration in combination with RapidPlan for head & neck radiotherapy planning," *Radiat Oncol*, vol. 13, no. 1, Nov. 2018, doi: 10.1186/S13014-018-1175-Y.
- [50] S. Zieminski, M. Khandekar, and Y. Wang, "Assessment of multi-criteria optimization (MCO) for volumetric modulated arc therapy (VMAT) in hippocampal avoidance whole brain radiation therapy (HA-WBRT)," *J Appl Clin Med Phys*, vol. 19, no. 2, pp. 184–190, Mar. 2018, doi: 10.1002/ACM2.12277.
- [51] S. Ghandour, O. Matzinger, and M. Pachoud, "Volumetric-modulated arc therapy planning using multicriteria optimization for localized prostate cancer," *J Appl Clin Med Phys*, vol. 16, no. 3, pp. 258–269, May 2015, doi: 10.1120/JACMP.V16I3.5410.
- [52] D. L. Craft, T. S. Hong, H. A. Shih, and T. R. Bortfeld, "Improved Planning Time and Plan Quality Through Multicriteria Optimization for Intensity-Modulated Radiotherapy," *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*, vol. 82, no. 1, pp. e83–e90, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.ijrobp.2010.12.007.
- [53] "Quienes Somos – HUV." Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://huv.gov.co/index.php/quienes-somos/>
- [54] "Hematología y Oncología – HUV." Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://huv.gov.co/index.php/hematologia-y-oncologia/>
- [55] "El servicio de radioterapia del HUV cuenta con nuevos equipos de última tecnología para la atención de los pacientes – HUV." Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://huv.gov.co/index.php/2021/04/06/el-servicio-de-radioterapia-del-huv-cuenta-con-nuevos-equipos-de-ultima-tecnologia-para-la-atencion-de-los-pacientes/>
- [56] "Páginas - Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad en Salud (SOGCS)." Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/salud/PServicios/Paginas/sistema-obligatorio-garantia-calidad-SOGC.aspx>
- [57] "LEY 1438 DE 2011", Accessed: Jun. 24, 2023. [Online]. Available: https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/LEY%201438%20DE%202011.pdf
- [58] "Pautas de Auditoría para el Mejoramiento de la Calidad de la Atención en Salud Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad," 2007, Accessed: Jun. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/CA/pautas-auditoria-mejoramiento-calidad-atencion-en-salud.pdf>
- [59] S. Díaz De Tuesta Rodríguez, J. Ramón, and G. Fervienza, "Métodos de planificación para técnicas avanzadas", Accessed: Jan. 07, 2023. [Online]. Available:



- https://plataforma.congresosefmssepr.es/event/4/contributions/2561/attachments/1395/1935/Metodos_Planificacion_Tecnicas_Avanzadas_SEFM_SD-JR.pdf
- [60] “ICRU 62 : ICRU : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive.” Accessed: Jan. 08, 2023. [Online]. Available: <https://archive.org/details/icru-62-1>
- [61] F. Médico, “PhD. Sandra Guzmán Calcina SRS-METÁSTASIS CEREBRALES Punto de vista del Físico Médico”, [Online]. Available: https://alatro2017.grupoaran.com/ponencias/7-noviembre-sala/1-fisico-medico_sandra-guzman2.pdf
- [62] J. E. GARAVITO CASTELLANOS, “ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO DE DOSIS EN EL SISTEMA DE PLANEACIÓN MONACO PARA VMAT EN PULMÓN”, [Online]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/20623/GaravitoCastellanosJoseEsau2016.pdf?sequence=1>
- [63] J. Alejandro and T. Gutierrez, “EVALUACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE TRATAMIENTOS DE RADIOTERAPIA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE DOSIMETRÍA PORTAL.” Accessed: Jul. 24, 2023. [Online]. Available: <http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/10807/TE-23528.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [64] D. A. Low, W. B. Harms, S. Mutic, and J. A. Purdy, “A technique for the quantitative evaluation of dose distributions,” *Med Phys*, vol. 25, no. 5, pp. 656–661, 1998, doi: 10.1118/1.598248.
- [65] “Plan Study Scoring – ProKnow Quality Systems.” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://support.proknowsystems.com/hc/en-us/articles/360022094014-Plan-Study-Scoring>
- [66] I. Ahmad *et al.*, “Plan quality assessment of modern radiotherapy delivery techniques in left-sided breast cancer: an analysis stratified by target delineation guidelines,” *BJR/Open*, vol. 2, no. 1, p. 20200007, Nov. 2020, doi: 10.1259/BJRO.20200007.
- [67] L. Marcelo Aranha Camargo, R. Paulo Martins Silva, and D. Ulises de Oliveira Meneguetti, “Research methodology topics: Cohort studies or prospective and retrospective cohort studies,” *J Hum Growth Dev*, vol. 29, no. 3, pp. 433–436, 2019, doi: 10.7322/jhgd.v29.9543.
- [68] M. De Salud, “RESOLUCION NUMERO 8430 DE 1993”, [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.PDF>
- [69] P. Rawla, “Epidemiology of Prostate Cancer,” *World J Oncol*, vol. 10, no. 2, p. 63, 2019, doi: 10.14740/WJON1191.
- [70] “Libertad y Orden Libertad y Orden COLCIENCIAS”, Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: www.colciencias.gov.co
- [71] L. Perna *et al.*, “Inter-observer variability in contouring the penile bulb on CT images for prostate cancer treatment planning,” *Radiation Oncology*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, Sep. 2011, doi: 10.1186/1748-717X-6-123/FIGURES/9.
- [72] I. Ayuthaya, S. Suriyapee, and T. Sanghangthum, “Validation of RapidPlan Knowledge-Based Model for Volumetric-Modulated Arc Therapy in Prostate Cancer,” *J Med Phys*, vol. 47, no. 3, p. 250, Jul. 2022, doi: 10.4103/JMP.JMP_138_21.
- [73] “Vista de Efectos secundarios de la radioterapia en la pelvis.” Accessed: Feb. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.piper.espacio-seram.com/index.php/seram/article/view/2725/1331>
- [74] E. Miguel-Chumacero, G. Currie, A. Johnston, and S. Currie, “Effectiveness of Multi-Criteria Optimization-based Trade-Off exploration in combination with RapidPlan for head & neck radiotherapy planning,” *Radiation Oncology*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, Nov. 2018, doi: 10.1186/S13014-018-1175-Y/TABLES/7.
- [75] A. M. Fanou *et al.*, “Implementation, Dosimetric Assessment, and Treatment Validation of Knowledge-Based Planning (KBP) Models in VMAT Head and Neck Radiation Oncology,” *Biomedicines 2023*, Vol. 11, Page 762, vol. 11, no. 3, p. 762, Mar. 2023, doi: 10.3390/BIOMEDICINES11030762.
-]98_*****l0Ub kj "gV'cif0"öRrvegi qrf gt "Vgzv'c"Uwf { .ö'Ekc'vqp"Uf ngu."xqf05."Lxr04243."f qk'3202Z0



10 ANEXOS

En este apartado se adjuntan algunos documentos utilizados en la ejecución de la investigación.

- I. **Anexo 1:** Registro planes de tratamiento para cáncer de próstata
- II. **Anexo 2:** Entrenamiento del modelo de planeación para cáncer de próstata
- III. **Anexo 3:** Carta y acta de aprobación del proyecto por parte del Comité de Ética en Investigaciones.



Anexo 1: Registro planes de tratamiento para cáncer de próstata

	HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL VALLE "EVARISTO GARCIA" E.S.E		CODIGO: XX-XX-XX-##			
	Registro planes de tratamiento para cáncer de próstata		VERSIÓN: ##	PAGINA ##	DE ##	##
			FECHA DE EMISIÓN:		DÍA ##	MES XX
1. Variables demográficas						
Código: _____	Fecha de nacimiento: _____		Fecha inicio tratamiento: _____			
Plan:	Plan inicial (PI) _____	Estadio: Bajo Riesgo _____	Edad: _____			
	RP V1.0 _____	Riesgo Intermedio _____				
	RP+MCO _____	Alto Riesgo _____				
2. Volumen tumoral						
2.1 Bajo Riesgo		2.2 Riesgo Intermedio		2.3 Alto Riesgo		
Vol. Próstata (cc) _____	Vol. Próstata (cc) _____		Vol. Próstata (cc) _____			
Vol. Vesículas (cc) _____	Vol. Vesículas (cc) _____					
Vol. Ganglios (cc) _____						
3. Volumen órganos a riesgo (OAR)						
Vol. Bulbo Peneano (cc) _____	Vol. Médula (cc) _____					
Vol. Cabeza Femoral izquierda (cc) _____	Vol. Recto (cc) _____					
Vol. Cabeza Femoral derecha (cc) _____	Vol. Vejiga (cc) _____					
Vol. Intestino delgado (cc) _____						
4. Dosis máxima de prescripción						
1. 6000 cGy _____	2. 6750 cGy _____		3. 7000 cGy _____			
5. Esquema de tratamiento						
Esquema 1: [7000, 6160, 5040] cGy _____	Esquema 5: 6750 cGy _____					
Esquema 2: [7000, 6160] cGy _____	Esquema 6: 6000 cGy _____					
Esquema 3: [6000, 5400] cGy _____	Esquema 7: Otro _____					
Esquema 4: 7000 cGy _____						
6. Evaluación parámetros de planeación						
Dosis de 7000 cGy o 6750 cGy						
Bulbo peneano	D_{media} (cGy) _____	Médula	D_{max} (cGy) _____			
	$V_{5000cGy}$ (%) _____	Recto	$V_{4000cGy}$ (%) _____			
	$V_{4000cGy}$ (%) _____		$V_{6500cGy}$ (%) _____			
Cabeza femoral derecha	$V_{5000cGy}$ (%) _____		$V_{7000cGy}$ (%) _____			
	D_{max} (cGy) _____		$V_{7000cGy}$ (cm ³) _____			
Cabeza femoral izquierda	$V_{5000cGy}$ (%) _____	Vejiga	$D_{50\%}$ (cGy) _____			
	D_{max} (cGy) _____		$V_{6500cGy}$ (%) _____			
Intestino delgado	$D_{0,1cc}$ (cGy) _____					



 HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL VALLE	HOSPITAL UNIVERSITARIO DEL VALLE		CODIGO:		XX-XX-XX-##				
	"EVARISTO GARCIA" E.S.E		VERSIÓN:		##	PAGINA	##	DE	##
	Registro planes de tratamiento para cáncer de próstata		FECHA DE EMISIÓN:		##	DÍA	MES	AÑO	
				##	XX	##			

Dosis de 6000 cGy

Bulbo peneano	$D_{max}(cGy)$	_____	Recto
	$V_{4860cGy}(\%)$	_____	
	$V_{4080cGy}(\%)$	_____	
Cabeza femoral derecha	$V_{4080cGy}(\%)$	_____	Vejiga
	$V_{5000cGy}(\%)$	_____	
Cabeza femoral izquierda	$V_{4080cGy}(\%)$	_____	
	$V_{5000cGy}(\%)$	_____	
Intestino delgado	$V_{4080cGy}(cc)$	_____	
Médula	$D_{max}(cGy)$	_____	

7. Parámetros de calidad

Objetivo	IC	IH
Próstata		
Vesículas		
Ganglios		

Plan	Índ. gamma
PI vs RP V1.0	
PI vs RP+MCO	
RP V1.0 vs RP+MCO	

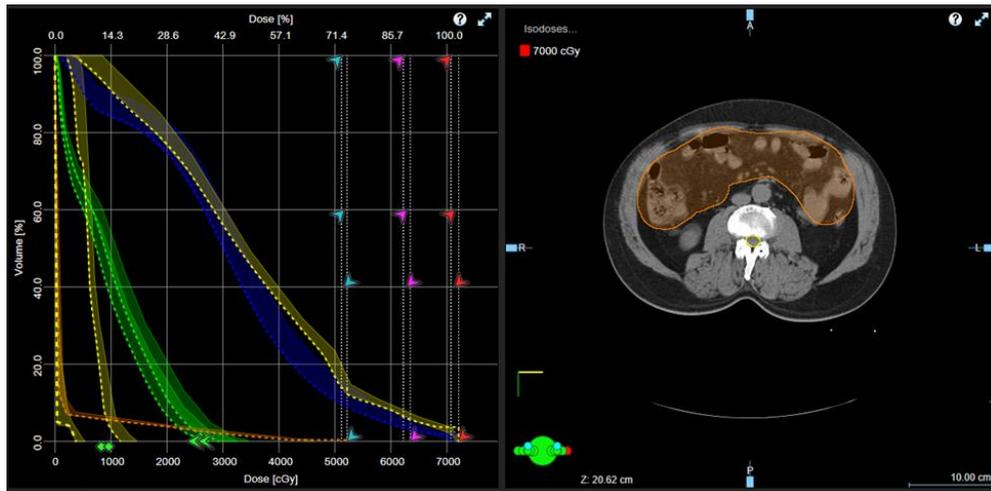
Observaciones _____

Responsable del registro _____



Anexo 2: Entrenamiento del modelo de planeación para cáncer de próstata

Entrenamiento del modelo basado en el conocimiento para cáncer de próstata (RP+MCO)



El modelo de planeación basado en el conocimiento está diseñado para usarse en planes de tratamiento VMAT, para la región de la pelvis, específicamente para cáncer de próstata en sus diferentes estadios (bajo riesgo, riesgo intermedio y alto riesgo) en SIB. El modelo fue entrenado con 140 planes de tratamiento, de los cuales 41 corresponden a bajo riesgo (1 o 2 arcos), 49 y 50 son para riesgo intermedio (1 o 2 arcos) y alto riesgo (2 o 3 arcos) respectivamente, usando el modelo de cálculo AcurosXB.

El modelo estima el DVH para los siguientes órganos en riesgo: bulbo peneano, cabezas femorales (izquierda y derecha), intestino delgado, médula, recto y vejiga.

El rendimiento o funcionamiento del modelo puede variar con el contorneado de las estructuras y la planificación del tratamiento.

1. Contorno de objetivos:

- **Bulbo peneano:** El bulbo peneano se debe contornear de acuerdo con los siguientes límites anatómicos como son los pilares laterales, cuerpos esponjosos anteriormente y el elevador del ano anteriormente.
- **Cabezas femorales:** son delimitadas desde el inicio de la cabeza femoral hasta el último corte del trocante menor (cuello femoral). Se deben delimitar ambas cabezas femorales de forma independiente.



- **Intestino delgado:** se considera un órgano complicado de estudiar debido a su anatomía, volumen y sobre todo a su movilidad, puede ser contorneado desde T11 o L5 hasta el suelo pélvico.
- **Médula:** se contornea el canal medular, se puede agregar un margen de 5 mm
- **Recto:** se debe contornear desde el borde anal hasta el inicio del pliegue sigmoideo, además debe delimitarse toda la circunferencia rectal.
- **Vejiga:** esta debe ser delimitada en toda la circunferencia, para mantener el contenido vesical estable se recomienda que el paciente inicialmente vacíe su vejiga y posteriormente beba una cantidad de líquido aproximadamente de 20 a 30 minutos antes del tratamiento.

Mientras que para el contorneado de los targets se tienen las siguientes indicaciones:

A la estructura volumétrica de PTV1 no se le realiza ningún tipo de cambio, la estructura denominada PTV2 es el resultado del PTV de vesículas seminales menos la intersección con PTV1 con una separación de 5 mm respecto al target, para PTV3 se define el volumen con la sustracción de la suma de PTV1 y PTV2 a 5mm de los ganglios.

2. Planificación de tratamiento

Todos los planes utilizados para entrenar y validar el modelo fueron planificados con CT en posición supina, se utilizó la técnica VMAT, los arcos tenían rotaciones de gantry alternada en sentido horario y antihorario, con rotación de colimador de 10° y 350°. Los arcos fueron configurados en un solo isocentro.

3. Códigos de estructuras:

Para la correcta asignación de los códigos de las estructuras a continuación, se muestra la lista de estos mismos:

Estructura	Código
PTV1	PTV_High
PTV2	PTV Intermediate
PTV3	PTV Low
Bulbo peneano	19614
Cabeza femoral derecha	32842, 55012, 55011
Cabeza femoral izquierda	32842, 55012, 55011
Intestino delgado	7200, 7199
Médula	7647
Recto	14544
Vejiga	15900

4. Configuraciones de optimización:



4.1 Creación y entrenamiento del modelo:

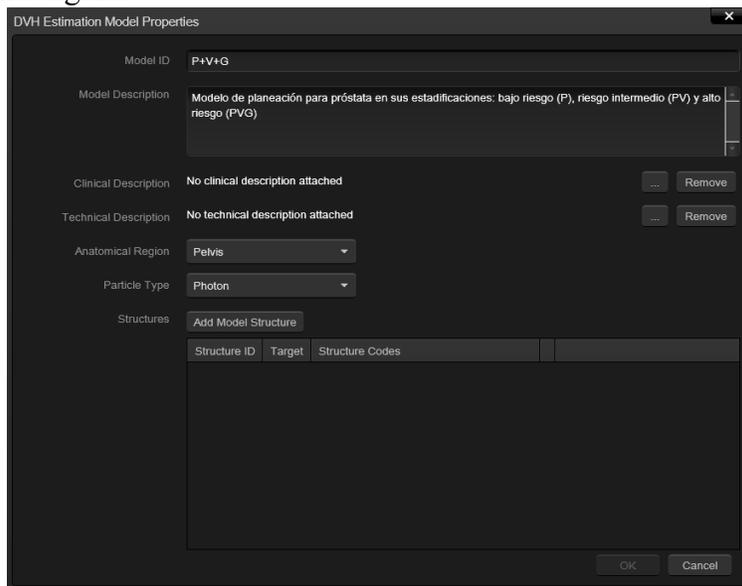
El modelo está constituido por 140 planes de tratamiento, para las diferentes estadificaciones, esquema de tratamiento y dosis máxima de prescripción:

ESTADIO	DOSIS MÁXIMA DE PRESCRIPCIÓN (cGy)	DOSIS POR FRACCIÓN (cGy)	NÚMERO DE FRACCIONES
BAJO RIESGO	6000	300	20
	6750	250	27
	7000	250	28
RIESGO INTERMEDIO	6000	300	20
	7000	250	28
ALTO RIESGO	6750	250	27
	7000	300	28

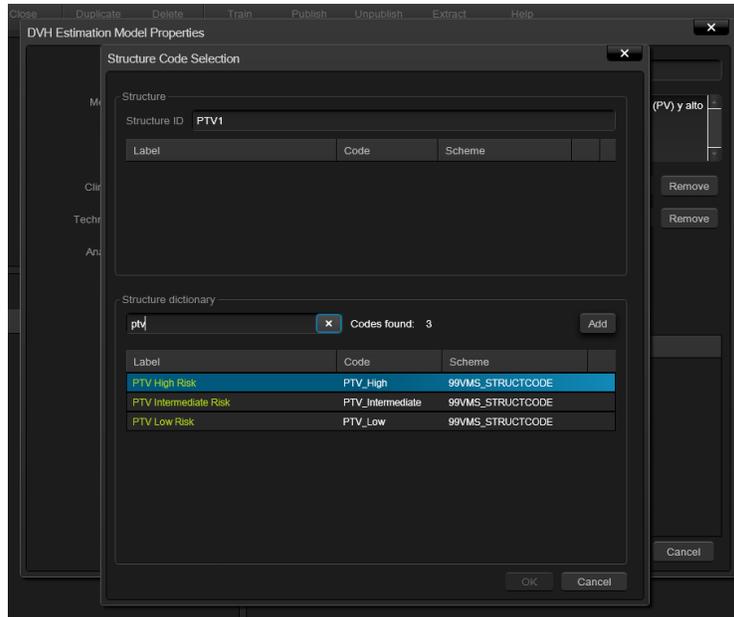
El modelo de planeación RP+MCO utiliza planes de tratamiento creados a partir del modelo de planeación RP V1.0, alimentado con 140 planes de tratamiento, usando tanto la técnica IMRT como VMAT. Los planes generados por RP V1.0 se reoptimizaron haciendo uso del software de MCO en busca de mejoras dosimétricas, posteriormente estos planes se convirtieron en conjunto de entrenamiento para el modelo 2. Los casos atípicos se omitieron del entrenamiento.

- **Creación del modelo:**

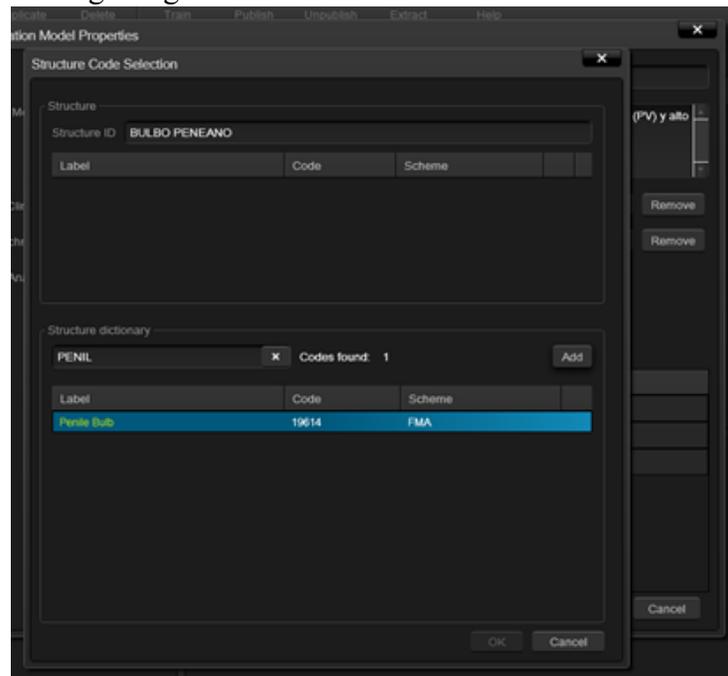
1. Dentro del módulo de Model Configuration se crea el modelo, en este espacio se asigna el respectivo nombre, región anatómica que se va a tratar, descripción general del modelo y partículas que se van a usar (en este caso fotones), como se muestra en la siguiente figura.



2. Luego se añaden las estructuras con las que se va a entrenar el modelo, como son targets y los OAR's.



3. Se agrega el identificador de la estructura (ID) y se procede a buscar dentro del diccionario de estructuras la que es de nuestro interés, con esta herramienta se puede observar el código asignado a las estructuras en cuestión.

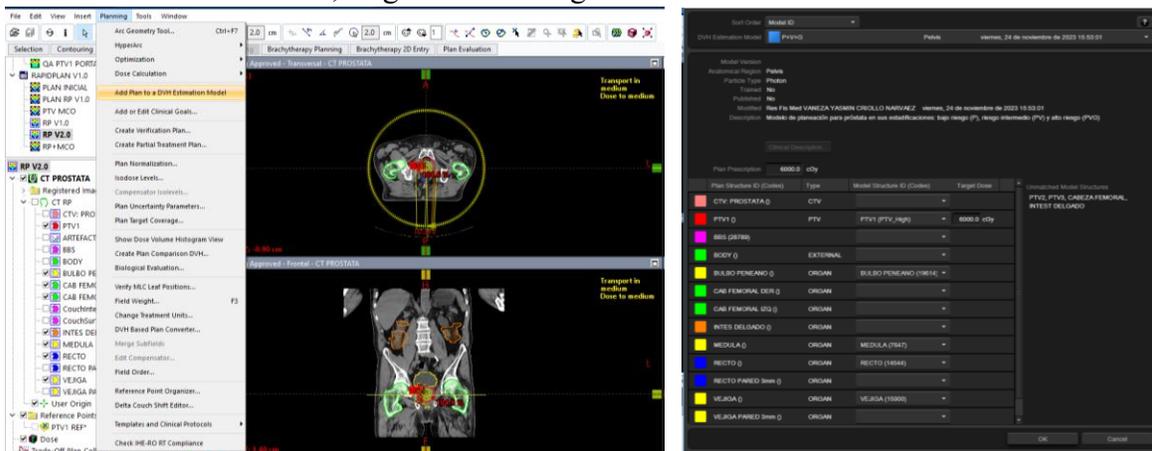


4. Luego de ingresar las estructuras se procede a agregar los objetivos de optimización para cada una de las estructuras, tanto para OAR's como para PTV's.

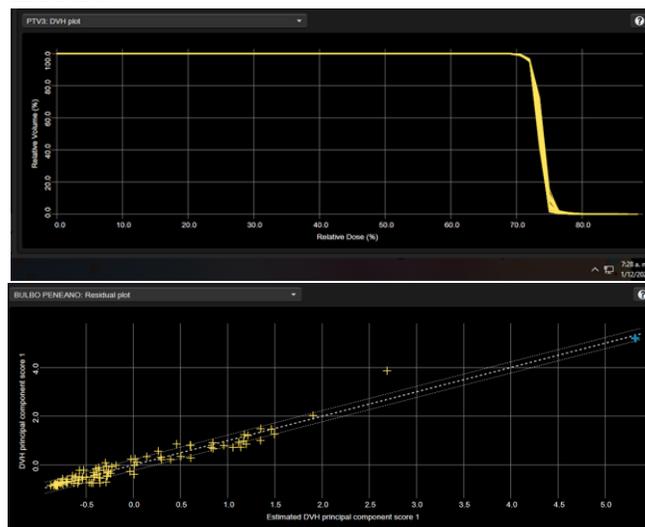


Model Structures and Objectives						Add Objectives to Structure...
Target	ID	Vol [%]	Dose	Priority	gEUD a	
Yes	PTV1		(PTV_High)			
Yes	PTV2		(PTV_Intermediate)			
Yes	PTV3		(PTV_Low)			
	BULBO PENEANO		(19614)			
	Line (preferring target)	Generated	Generated	Generated		X
	CABEZA FEMORAL	i5011, FemoralHeads)				
	INTEST DELGADO		(7199)			
	RECTO		(14544)			
	VEJIGA		(15900)			

5. A continuación, de crear el modelo se procede a añadir los planes con los que se va a entrenar el modelo, asignando el código determinado a cada una de las estructuras.



6. Al terminar de ingresar los planes se procede a extraer los datos de cada paciente y se entrena el modelo.





7. Para determinar los datos atípicos se hizo uso de una herramienta online proporcionada por VARIAN, con la cual se identificaron estos mismos y se procedió a retirarlos del entrenamiento.

8. Finalmente, el modelo fue alimentado con las siguientes cantidades de estructuras.

Estructura	Cantidad
PTV1	138
PTV2	95
PTV3	50
BULBO PENEANO	106
CABEZAS FEMORALES	236
INTESTINO DELGADO	126
MÉDULA	135
RECTO	122
VEJIGA	116

5. Validación y verificación

El modelo RP+MCO se validó utilizando los 140 planes incluidos en el conjunto de entrenamiento del modelo final. Mientras que para la verificación se llevó a cabo con 30 registros de pacientes externos a los usados en el entrenamiento del modelo.

Se utilizaron los siguientes constraints para la validación del modelo, (a) para dosis de 6000 cGy y (b) para dosis máximas de prescripción de 6750 cGy o 7000 cGy.

Organo a riesgo	Restricción de dosis	Organo a riesgo	Restricción de dosis
Bulbo peneano	$V(4080 \text{ cGy}) \leq 50\%$ $V(4860 \text{ cGy}) \leq 25\%$ $D_{max} \leq 5000 \text{ cGy}$	Bulbo peneano	$D_{media} \leq 5200 \text{ cGy}$ $V(5000 \text{ Gy}) \leq 20\%$ $V(4000 \text{ Gy}) \leq 40\%$
Cabezas femorales	$V(4080 \text{ cGy}) \leq 50\%$ $V(5000 \text{ cGy}) \leq 10\%$	Cabezas femorales	$V(5000 \text{ cGy}) \leq 10\%$ $D_{max} \leq 6800 \text{ cGy}$
Intestino delgado	$V(4080 \text{ cGy}) \leq 17 \text{ cc}$	Intestino delgado	$V_{max} 0.03 \text{ cc} \leq 5000 \text{ Gy}$
Recto	$V(6000 \text{ cGy}) \leq 3\%$ $V(5700 \text{ cGy}) \leq 15\%$ $V(5280 \text{ cGy}) \leq 30\%$ $V(4860 \text{ cGy}) \leq 50\%$ $V(4080 \text{ cGy}) \leq 60\%$	Recto	$V(4000 \text{ cGy}) \leq 52\%$ $V(6500 \text{ cGy}) \leq 22\%$ $V(7000 \text{ cGy}) \leq 10\%$ $V(7000 \text{ cGy}) \leq 10 \text{cc}$
Vejiga	$V(6000 \text{ cGy}) \leq 5\%$ $V(4860 \text{ cGy}) \leq 25\%$ $V(4080 \text{ cGy}) \leq 50\%$	Vejiga	$D50\% \leq 5000 \text{ cGy}$ $V(6500 \text{ cGy}) \leq 10\%$

(a)

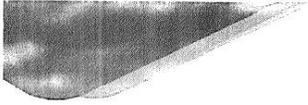
(b)



Nota: La elaboración de los planes con los modelos, siguió una configuración en la cual se usó el tiempo extendido de cálculo para cada paciente, este representa el doble del que se usa por defecto, con la finalidad de que las interacciones se estabilicen y el algoritmo de cálculo encuentre la mejor solución para el plan.



Anexo 3: Carta y acta de aprobación del proyecto por parte del Comité de Ética en Investigaciones.



Espacio para el Adhesivo Radicador de la Ventanilla Única del Hospital Universitario del Valle



Fecha: 27 FEB 2024
No. Radicado: D-067
Hora: 11:34 am
Firma: Evaristo García E.S.E.
Folios: 2 Folios

[110]
Hospital Universitario del Valle: Santiago de Cali, 26/02/2024

Investigadores:
Vaneza Yasmín Criollo Narvaez

Universidad Nacional de Colombia
Santiago de Cali, Valle del Cauca

Asunto: Notificación Comité de Ética en Investigación Acta No.004
Código del proyecto: INT223

Cordial saludo

Agradecemos a la presente notificación del Comité de Ética en Investigación de su proyecto "Implementación de la planeación de cáncer de próstata mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización multicriterio en un hospital público de mediana y alta complejidad del suroccidente colombiano, 2023", el cual fue presentado y discutido en sesión el día 26 de febrero del año 2024; se determinó por el comité permitir su desarrollo al interior del Hospital Universitario del Valle.

Agradecemos tener en cuenta el procedimiento establecido por el Comité para proceder a la ejecución del trabajo, ya que una vez finalizado el mismo toda publicación que se derive del protocolo de investigación debe ser revisada y avalada nuevamente por este comité.

Atentamente,

Presidente
Comité de Ética en Investigación

Anexos: UN (1) Folio
Copia archivo: Documento digital
Proyecto : Carlos Andrés Ocampo Montoya Secretario Técnico del Comité de Ética en Investigaciones.

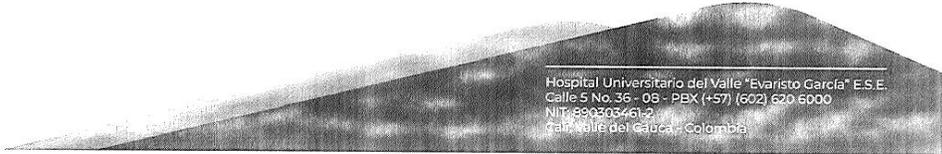
ENERO 2024 V3

FOR-GDI-GDO-007

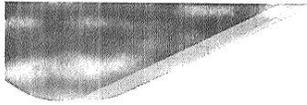
www.hus.gov.co

@husoficial

Logos de redes sociales



Hospital Universitario del Valle "Evaristo García" E.S.E.
Calle 5 No.36 - 08 - PBX (+57) (602) 620 6000
NIT: 890303461-2
Cali, Valle del Cauca - Colombia



Seguimos Haciendo Historia

Comité de Ética en Investigaciones Hospital Universitario del Valle "Evaristo García" E.S.E.

Estudio: "Implementación de la planeación de cáncer de próstata mediante un modelo basado en el conocimiento y optimización multicriterio en un hospital público de mediana y alta complejidad del suroccidente colombiano, 2023",

Investigadores: Vaneza Yasmin Criollo Narvaez

Código: 030-2024

Código del proyecto: INT223

Fecha de Revisión: 26/02/2024

El comité de Ética en Investigaciones del Hospital Universitario del Valle "Evaristo García", Empresa Social del Estado, constituido mediante Resolución GG3600-2018, Certifica que:

1. Los miembros del Comité revisaron los documentos presentes para la aprobación del presente proyecto de investigación a desarrollar en el Hospital Universitario del Valle.

Propuesta De Investigación	<u> X </u>
Instrumento De Recolección De La Información	<u> X </u>
Formato De Consentimiento Informado	<u> X </u>
Carta De La O Las Instituciones Participantes	<u> X </u>
Resumen De Hoja De Vida De Los Investigadores Principales Y Asesor	<u> X </u>
Carta De Aprobación Del Presidente Del Comité De Investigaciones	<u> X </u>
Respuesta A Las Preguntas Del Comité De Ética En Investigaciones	<u> X </u>
Una Copia En Medio Magnético Del Proyecto	<u> X </u>

2. La Clasificación Del Riesgo De Conformidad Con La Resolución No. 008430 Del Ministerio De La Protección Social Es:

Sin Riesgo _____ Riesgo Mínimo X Riesgo Mayor del Mínimo _____

3. El consentimiento informado evidencia la voluntariedad, la información, capacidad de decisión y comprensión por parte del sujeto de investigación: **Cumple con los requerimientos de la norma.**

4. El investigador principal deberá informar al Comité a través del presidente o el secretario:
- Los cambios (Enmiendas), propuestas al proyecto antes del inicio para su respectiva aprobación.
 - Las dificultades o imprevistos que suponen riesgos para los pacientes u otras personas.
 - Eventos adversos serios presentados.
 - La suspensión o terminación del proyecto (Estudio)
 - Informe parcial y/o final del estudio en un periodo no mayor de 12 meses.

5. Tiempo de aprobación: el presente proyecto en caso de ser aprobado, la misma e será avalada por un periodo de dos, (2) años calendario a partir de la fecha de su aprobación, al cabo de este tiempo deberá ser sometido a una nueva revisión por parte del Comité de Ética en Investigaciones del Hospital Universitario del Valle.

6. El presente proyecto.
(X) SE APRUEBA () NO SE APRUEBA () REQUIERE MODIFICACIONES

Para constancia se firma en Santiago de Cali, el día 26 del mes de 02 del año 2024

Cecilia S. Jarama P.
Presidente
Comité de Ética en Investigación

Hospital Universitario del Valle "Evaristo García" E.S.E.
Calle 5 No. 36 - 08 - PBX (+57) (602) 620 6000
NIT: 890303461-2
Cali, Valle del Cauca - Colombia

ENERO 2024 V3

FOR-CDI-CDIC-007

www.hun.gov.co

@huvoficial

