

# Evaluación de la técnica Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) para la Irradiación Cráneo-Espinal (ICE) en pacientes adultos con meduloblastoma y su comparación dosimétrica con Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (RTC-3D) y Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT)

Evaluation of Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) technique for Craniospinal Irradiation (CSI) in adult's patients with medulloblastoma and its dosimetric comparison with three-dimensional conformal radiotherapy (3DCRT) and intensity-modulated radiation therapy (IMRT)

Mariangel Rodríguez Leones<sup>1</sup>, Jesús Dávila Pérez<sup>2</sup>, Lila Carrizales Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) / Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LCSD), Estado Miranda, Venezuela

<sup>2</sup> Centro Médico Docente la Trinidad (Grupo de Radioterapia Oncológica "GURVE") / Departamento de Física Médica, Caracas, Venezuela

## Resumen

El objetivo de esta investigación es evaluar las ventajas y desventajas dosimétrica que ofrece la técnica de Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) para la Irradiación Cráneo-Espinal (ICE) en pacientes adultos con meduloblastoma en comparación a las técnicas de Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (RTC-3D) y Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT). Se seleccionaron las Tomografías Computarizadas (TC) de 15 pacientes adultos jóvenes, a quienes se les administró RTC-3D en posición prono. La planificación de RTC-3D se fundamentó en 2 campos laterales opuestos para irradiar el encéfalo y la parte superior de la columna cervical (hasta C4) y 2 campos postero-anterior directo para el resto del canal espinal. Para los planes de IMRT y VMAT los campos/arcs fueron superpuestos dentro de un mismo plan de tratamiento. 7 campos/2 arcos coplanares se emplearon para tratar al encéfalo y la columna cervical, 3 campos/ 1 arco tanto para irradiar a la columna dorsal como la columna lumbar. Los resultados muestran que en los planes de VMAT e IMRT los Índices de Conformidad (IC) e Índices de Homogeneidad (IH) de dosis dentro del Volumen Blanco de Planificación "PTV (ICE)" son superiores a los de RTC-3D. La dosis máxima y media que reciben los ojos, cristalinos y tiroides se reducen tanto en los planes de VMAT como los planes de IMRT. Así mismo, la dosis media que reciben los nervios ópticos, esófago, corazón y el hígado, siendo más evidente la protección en estos últimos y para el intestino delgado por los planes de IMRT, aunque con estas técnicas se incrementan la dosis media en pulmones, estómago y riñones, estando todas dentro de la dosis de tolerancia.

**Palabras clave:** Irradiación Cráneo-espinal (ICE), Órganos a Riesgo (OAR), Índice de Conformidad (IC), Índice de Homogeneidad (IH) y Dosis media.

## Abstract

*The aimed of this research is to evaluate the dosimetric advantages and disadvantages that offer the Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) technique for the Craniospinal Irradiation (CSI) in adult's patients with medulloblastoma compared to the three-dimensional conformal radiotherapy (3DCRT) technique and intensity-modulated radiation therapy (IMRT). The Computed Tomography (CT) of fifteen young adult's patients treated in the prone position with 3DCRT were selected. The 3DCRT planning was based in two opposed lateral cranial fields to treat the brain and the cervical spinal upper (up to C4) and two direct posterior- anterior fields to treat the spine. For the IMRT and VMAT plans, the fields/ arcs were overlaying within the same treatment plan. Seven fields/ two coplanar arcs were employed to treat to brain and the cervical spine, three fields/ one arc to irradiate both the upper spine and the lower spine. The results show that the dose Conformity Index (CI) and Homogeneity Index (IH) within the Planning Target Volume "PTV (ICE)" are better in the VMAT and IMRT plans compare with the 3DCRT plans. The maximum and mean dose received by the eyes, lenses and thyroid are reduced both in the VMAT plans and IMRT. Likewise, the mean dose received by optic nerves, esophagus, heart and liver, being more evident the protection for these later and small bowels by IMRT plans, although these techniques increase the mean dose in lungs, stomach and kidneys, all being within the tolerance doses.*

**Keywords:** Craniospinal irradiation (CSI), Organ to Risk (OAR), Conformity Index (CI), Homogeneity Index (IH) and mean dose.

## 1. Introducción

La Irradiación Cráneo Espinal (ICE) es una componente esencial en el tratamiento profiláctico y de tumores intracraneales primarios con alto riesgo de diseminación leptomenígea, tal como el Meduloblastoma (MB) (1), el cual tiende a

desarrollarse en los niños cerca del vermis (puente estrecho con forma de gusano que conecta los hemisferios cerebelosos); y en los adultos en el cuerpo del cerebelo específicamente próximo a los bordes (2). La Organización Mundial de la Salud (OMS), lo clasifica en el grupo de tumores embrionarios de Grado IV, representando el 20 % de

los tumores cerebrales pediátricos, siendo la segunda causa de muerte en la infancia (3). Su mayor incidencia ocurre entre los 3 y 4 años. Sin embargo, el 50 % de los casos pueden aparecer después de los 5 años.

Este tipo de neoplasia maligna es poco frecuente en adultos, representando solo el 2 % de los tumores cerebrales y se manifiesta entre los 20 a 40 años de edad (4). La cirugía, la radioterapia y la quimioterapia son los tratamientos utilizados para erradicar este tumor (2). La RT se administra mediante la ICE con el paciente en posición decúbito prono y/o supino utilizando adecuados dispositivos de inmovilización (5).

La ICE puede administrarse en niños y adultos con intención curativa a paliativa, empleando técnicas de Radioterapia Convencional 2D y Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (RTC-3D)<sup>1</sup>. Debido a que las unidades de tratamiento de Radioterapia sólo permiten una apertura máxima de tamaño de campo de 40x40 cm<sup>2</sup> y la longitud del Volumen Blanco de Planificación "PTV (ICE)" excede a esta dimensión, es menester administrar dos o tres planes de tratamiento para los pacientes adultos, uno para cubrir el encéfalo y dos para irradiar el canal espinal. Es decir, se utilizan dos campos laterales opuestos con técnica isocéntrica para irradiar el encéfalo y la parte superior de la columna cervical (hasta C4) y dos campos postero-anterior directo con técnica Distancia Fuente Superficie (SSD) para el resto del canal espinal<sup>5</sup>. A fin de corregir la divergencia del haz de radiación entre la unión del campo craneal respecto al campo dorsal, se realizan angulaciones de la camilla del tratamiento y del colimador del Acelerador Lineal (AL) (5). Una de las desventajas de esta técnica es que se originan heterogeneidades de dosis dentro del "PTV (ICE)" en las dos regiones de unión de los campos de tratamiento. Para reducir dichas heterogeneidades se emplea la técnica cambiante (Feathering) que consiste en el desplazamiento semanal de estos puntos de unión de campo durante el curso de irradiación (6). Sin embargo, la gran desventaja radica en que tan sólo un pequeño error en la configuración de los campos puede acarrear altas o bajas dosis dentro y fuera del "PTV (ICE)" y en consecuencia la aparición de eventuales lesiones radioinducidas (mielopatía) y con ello el fracaso del tratamiento (6).

Halperin E, realizó un estudio sobre el impacto de la técnica de radioterapia en el resultado del tratamiento de Meduloblastoma, revelando la radiosensibilidad de este tumor y que cualquier modificación de la técnica de Radioterapia que origine mejores distribuciones de dosis dentro del "PTV (ICE)", conducirá a una mayor Probabilidad del Control Tumoral (PCT) y a mejores ganancias terapéuticas. Asimismo, indicó que pequeñas reducciones de la dosis por fracción y la dosis total (al menos el 10 % de la dosis prescrita), que resulte de las dificultades en la configuración de los campos en las regiones de unión, producen "Puntos fríos" que anidarán la recurrencia del tumor primario comprometiendo así el éxito terapéutico (7).

En base a lo expuesto, actualmente se está implementado el uso de técnicas avanzadas para la ICE, a fin de evaluar sin con ellas se reducen las incertidumbres geométricas presentada con RTC-3D1. En estas se incluyen; la Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) que permite adaptar al haz de radiación con alta precisión al volumen tumoral, logrando una mejor distribución de dosis y mayor protección a los órganos a riesgo que inevitablemente están inmersos en el plan de tratamiento (8). La ventaja de emplear IMRT para la ICE, consiste en reducir la dosis promedio en los ojos, cristalinos, nervios ópticos, tiroides, intestino delgado, hígado y específicamente en corazón y esófago. Sin embargo, la principal desventaja inherente a la propia técnica es el mayor volumen irradiado con bajas dosis y su probabilidad de riesgo a largo plazo de tumores secundarios, debido al incremento de las Unidades Monitor (UM) (4).

Otras técnicas que pueden emplearse para irradiar este tipo de neoplasia y minimizar las desventajas de IMRT son la Tomoterapia Helicoidal (TH) y la Terapia con Protones (9), pero estas técnicas son muy onerosas por lo que no son accesibles. No obstante, existe la alternativa de la Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT), que permite la irradiación modulada simultánea con la rotación continua del Gantry y la variación de la tasa de dosis durante la administración de la terapia y en menor tiempo respecto a la IMRT (8).

El objetivo de este estudio es desarrollar un protocolo de planificación para la ICE en pacientes adultos con meduloblastoma, empleando VMAT y evaluar las ventajas y desventajas dosimétricas que ofrece esta técnica al compararla con las de RTC-3D e IMRT, mediante los Índices de Conformidad (IC) e Índices de Homogeneidad (IH) de dosis dentro del "PTV (ICE)" y la dosis promedio recibida por los Órganos a Riesgo (OAR).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Imágenes Tomográficas Computarizadas (TC)

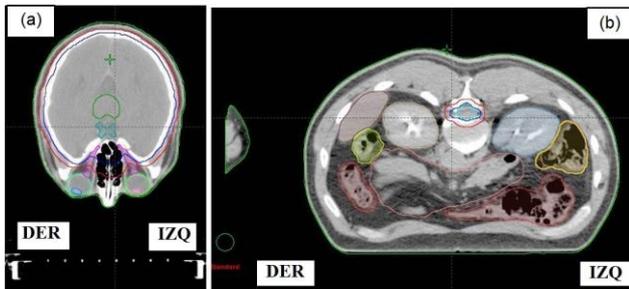
Se utilizaron las Tomográficas Computarizadas (TC) de 15 pacientes adultos jóvenes masculinos, en edades comprendidas de 15 a 24 años diagnosticados con Meduloblastoma a quienes se les administró previamente Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (RTC-3D) entre los años 2010-2015, en el Centro Médico Docente "La Trinidad" Grupo (GURVE), Caracas- Venezuela.

Todos los pacientes fueron sometidos a una TC de simulación en posición decúbito prono, utilizando como dispositivo de inmovilización; un soporte Prono, una máscara larga/corta y un colchón al vacío. Con un rango de exploración desde la parte superior del encéfalo hasta las cabezas femorales (incluyendo todo el torso y los brazos) y un espesor de corte de 3 mm.

### 2.2 Delimitación de Volúmenes

Se importaron las imágenes Tomográficas Computarizadas (TC) al Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) Eclipse v10.0 y en ellas se delimitó

el Volumen Blanco de Planificación “PTV (ICE)” y los Órganos a Riesgo (OAR), siguiendo las recomendaciones del ICRU 62 (10) y lo establecido por Buchsbaum Jeffrey (11). El Volumen Tumoral Clínico “CTV (ICE)” comprende la suma del CTV cerebral (que abarca todo el espacio subdural más un margen de 0.6 cm) y el CTV espinal (que contiene todo el espacio subdural desde C1 hasta el borde inferior de S2 más un margen de 0.6 cm, extendiéndose lateralmente para abarcar los ganglios espinales). El “PTV (ICE)” fue creado por la adición de un margen volumétrico uniforme de 0.5 cm alrededor del “CTV (ICE)”. Los OAR definidos fueron: cristalinos, ojos, nervios ópticos, tiroides, esófago, corazón, pulmones, hígado, estómago, intestino delgado y riñones. La figura 1 muestra dos cortes de TC a nivel del encéfalo y las vértebras (T12-L1), donde se visualiza la delimitación del: “CTV (ICE)” (Azul), “PTV (ICE)” (Rojo) y los OAR. En la figura 2 se observa tanto en una reconstrucción 2D como 3D la delimitación del “CTV (ICE)”, “PTV (ICE)” y los OAR en la TC de uno de los pacientes seleccionados en nuestro estudio.



**Figura 1.** Corte Axial de Tomografía Computarizada: (a) A nivel del encéfalo: El CTV (ICE) fue contorneado en color (azul), el PTV (rojo), los ojos (verde), cristalinos (azul y rosado), nervios ópticos (fucsia), tallo cerebral (verde militar) y quiasma óptico (turquesa). (b) A nivel de T12-L1: El CTV y el PTV se extiende lateralmente para cubrir los ganglios espinales. Se delimitó el intestino delgado (rosado), colon ascendente- transverso-descendente (amarillo), los riñones (azul y beis) y el bazo (marrón).

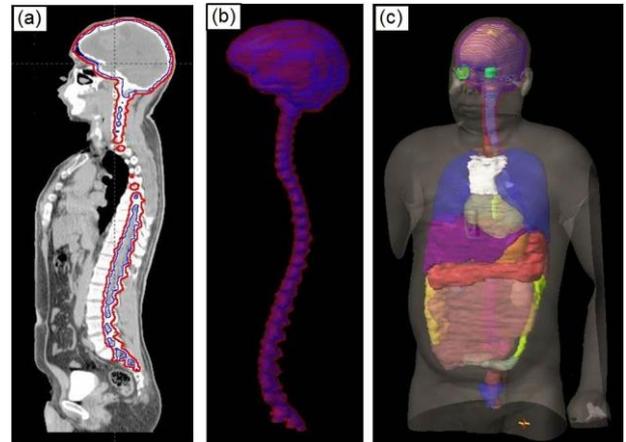
### 2.3 Verificación de los Planes de Tratamientos

Se empleó un maniquí de Polimetilmetacrilato “PMMA” (marca PTW, modelo universal IMRT, serial T40020.1.010), dos cámaras de ionización [marca PTW, modelo Semiflex (TN310010), serial (1169 y 0157)], un electrómetro (marca PTW, modelo Tándem Dual, serial 50098), un termómetro y barómetro.

### 2.4 Planes de Tratamiento y Evaluación

En todos los casos la dosis prescrita para la Irradiación Cráneo Espinal (ICE) fue 36 Gy entregada en 1.8 Gy por fracción. Los planes fueron generados en el Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) Eclipse v10.0 (Varian Medical Systems, Palo Alto, USA), utilizando como máquina de tratamiento el Acelerador Lineal (Varian, Clinac iX versión Trilogy), con un potencial de aceleración de 6 MV y equipado con el Colimador Multiláminas (MLC) de 120 láminas modelo Millenium y una mesa de tratamiento (Exact©). Para cada paciente se crearon 3 planes de tratamiento empleando; Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (RTC-3D), Radioterapia de Intensidad

Modulada (IMRT) y Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) para un total de 45 planes. El objetivo fue evaluar el Volumen del Blanco de Planificación “PTV (ICE)” que recibe el 95 % de la dosis prescrita (V95 %) y el volumen de este que recibe una dosis mayor al 107 % (V107 %). La dosis en los planes de tratamiento se calculó mediante el Algoritmo Analítico Anisotrópico (AAA).



**Figura 2.** (a) Reconstrucción 2D en un plano sagital del CTV (ICE) y PTV (ICE), (b) y (c) Reconstrucción 3D de todos los volúmenes delimitados (CTV, PTV y OAR) en un paciente simulado en posición prono.

### 2.4.1 Planes de Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (RTC-3D)

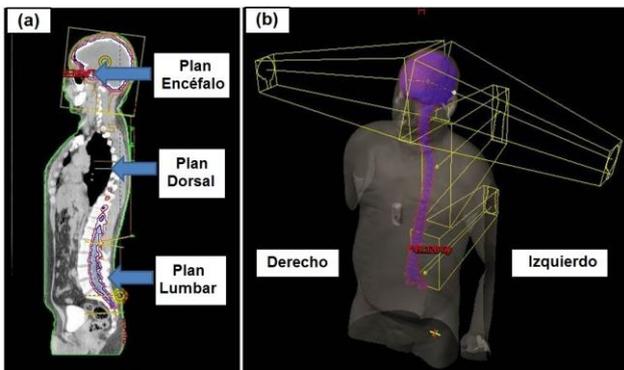
Dado que el máximo tamaño de campo de la unidad de tratamiento es 40x40 cm<sup>2</sup> y la longitud promedio del Volumen Blanco de planificación “PTV (ICE)” de los casos estudiados es 79.0 cm, para RTC-3D se emplearon, dos campos laterales opuestos con técnica isocéntrica para irradiar el encéfalo y la parte superior de la columna cervical (hasta C4) y dos campos directos postero-anterior con técnica (SSD) para el resto del canal espinal. Asimismo, se aplicaron angulaciones de camilla y del colimador del equipo, para alinear la divergencia del haz de radiación en la unión de los campos craneales respecto al dorsal, los cuales fueron determinados a partir de las ecuaciones 1 y 2:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{Ld}{2DFS} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{Lc}{2DFS} \right) \quad (2)$$

Dónde:  $\theta$ , es el ángulo de rotación de la camilla,  $\beta$ , es ángulo de rotación del colimador,  $Ld$ , es el largo del campo dorsal,  $Lc$ , es el largo del campo craneal y  $DFS$ , es la distancia fuente- superficie (12).

Un ejemplo de la planificación realizada para uno de los pacientes, se muestra en la figura 3, donde la suma de los 3 planes de tratamiento se ejecutó sobre una misma imagen de Tomografía Computarizada (TC), originándose así dos regiones de unión de campo que producen heterogeneidades de dosis dentro del Volumen Blanco de Planificación “PTV (ICE)”.



**Figura 3.** (a) Corte sagital y (b) Reconstrucción en 3D, donde se muestra la suma de los 3 planes de tratamiento para la ICE, así como la alineación del haz de radiación en la unión de los campos craneales respecto al campo dorsal.

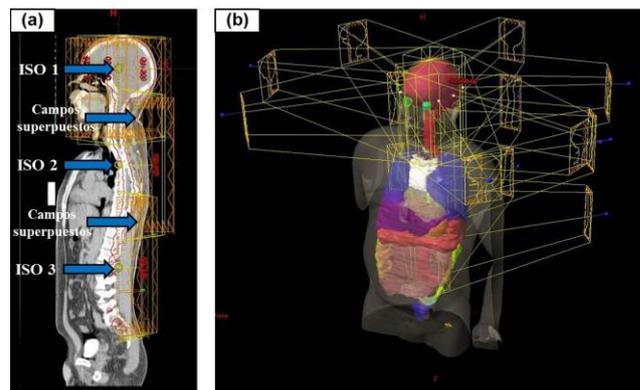
**2.4.2 Planes de Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT)**

Todos los planes de tratamiento se realizaron mediante planificación inversa. Y para lograr que la dosis fuera homogénea en todo el Volumen Blanco de Planificación “PTV (ICE)”, se siguieron las recomendaciones de Zheng W et al. (9). El método propuesto consiste en ubicar 3 isocentros (ISO) a una misma distancia desde la fuente (100 cm). El primero de ellos (ISO 1) se localizó en la línea media del encéfalo, el segundo (ISO 2) en la columna dorsal y el tercero (ISO 3) en la columna lumbar. Como se observa en la figura 4 (a), cada isocentro (ISO) está separado uno respecto al otro por una distancia de aproximadamente 26 cm y entre ellos se originaron dos regiones de superposición de campos con longitudes de 12 y 13 cm. Para el ISO 1 tal como lo muestra la figura 4 (b), se emplearon 7 campos de tratamiento con las siguientes angulaciones del Gantry: 0°, 60°, 100°, 135°, 225°, 260° y 300°. Por su parte, en el ISO 2 e ISO 3 por cada uno, se utilizaron 3 campos angulados a 0°, 45° y 315°.

Con esta estrategia de planificación no es necesario hacer angulaciones de la camilla, ni del colimador del Acelerador Lineal (AL). Asimismo, se garantiza una transmisión uniforme de la dosis en las regiones de superposición de campos, puesto que todos los campos se optimizan simultáneamente en el mismo plan de tratamiento.

Diferentes estrategias de optimización fueron aplicadas para alcanzar planes de tratamiento clínicamente aceptables, en términos de restricciones Dosis - Volumen (tabla 1), estructura artificial, Volumen tumoral Clínico (CTV) y Volumen Blanco de Planificación (PTV) parciales y la herramienta de Objetivo de Tejido Normal (NTO) implementada en Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) Eclipse.

La estructura artificial, es un volumen delimitado alrededor y fuera del Volumen Blanco de Planificación (PTV), con un cierto espesor y margen de separación de este. Su objetivo es conformar la dosis dentro del PTV y minimizar la irradiación de tejidos circundantes (13).



**Figura 4.** (a) Corte sagital muestra la ubicación de los 3 isocentros y las dos regiones de superposición de campos y (b) Reconstrucción en 3D del arreglo de los campos por cada isocentro en un plan de IMRT para un paciente de nuestro estudio simulado en posición prono.

**Tabla 1.** Restricciones Dosis – Volumen para el “CTV (ICE)”, “PTV (ICE)” y los OAR utilizada en los planes de tratamientos de IMRT y VMAT. Las tolerancias de dosis en los OAR se tomaron de Emami (14) y QUANTEC (15). Nota: <sup>a</sup> Parámetro definido sólo durante la optimización de los planes de VMAT.

Volumen		Parámetros	
“CTV (ICE)” y “PTV (ICE)”		D <sub>100</sub> % = 36 Gy	
		D <sub>max</sub> < 37.8 Gy	
“CTV (Encéfalo)”/ “CTV (Espinal)” y PTV (Espinal)		D <sub>100</sub> % = 36 Gy	
		D <sub>max</sub> < 37.8 Gy	
Órganos a Riesgo (OAR)			
Volumen		Parámetros	
Cristalino		D <sub>max</sub> < 8.5 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 7 Gy	
Ojos		D <sub>max</sub> < 32 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 16 Gy	
Nervios ópticos		D <sub>max</sub> < 36 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 30 Gy	
Tiroides		D <sub>max</sub> < 25 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 14 Gy	
Esófago		D <sub>max</sub> < 26 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 15 Gy	
Intestino Delgado		V <sub>33</sub> < 5 %	
		D <sub>max</sub> < 28 Gy	
Pulmones		V <sub>4</sub> < 42 %	
		V <sub>18</sub> < 22 %	
		D <sub>max</sub> < 25 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 5.5 Gy	
Hígado		D <sub>max</sub> < 22 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 7 Gy	
Estómago		D <sub>max</sub> < 20 Gy	
		V <sub>27</sub> < 46 %	
Corazón		V <sub>20</sub> < 10 %	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 7 Gy	
Riñones		D <sub>max</sub> < 16 Gy	
		<sup>a</sup> D <sub>med</sub> = 5 Gy	
Cuerpo		D <sub>max</sub> < 36 Gy	

En nuestro caso, esta estructura sólo se definió para el canal espinal teniendo 1 cm de espesor y separado 0.5 cm del Volumen Blanco de Planificación “PTV (ICE)”. A fin de reforzar la homogeneidad de la dosis dentro del “PTV (ICE)” durante la optimización se usaron varias estructuras como volúmenes blancos entre ellos; Volumen Tumoral Clínico “CTV (encéfalo)”, Volumen tumoral Clínico “CTV (espinal)” y PTV (Espinal)<sup>1</sup>. Para reducir la dosis fuera del “PTV (ICE)” y prevenir regiones sobre-dosificadas en el tejido sano, se activó la herramienta (NTO) implementada en el Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) Eclipse, considerando los siguientes parámetros de evaluación: distancia desde

el borde del *PTV* (ICE): 0.25 cm, Dosis inicial: 105 %, Dosis final: 50 % y caída de la dosis: 0.15. Finalmente, como se muestra la tabla 1, se aplicaron restricciones de Dosis - Volumen al “*CTV* (ICE)”, “*PTV* (ICE)”, “*CTV* (encéfalo)”, “*CTV* (espinal)”, *PTV* (Espinal), OAR y a la estructura artificial. Al culminar la optimización se calculó la distribución de dosis mediante el Algoritmo Analítico Anisotrópico (AAA).

2.4.3 Planes de Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT)

La tabla 2, ilustra el protocolo de planificación más óptimo encontrado en este estudio. Se localizaron 3 isocentros en diferentes regiones del Volumen Blanco de Planificación “*PTV* (ICE)” y como se observa en la figura 5 (a), el primer isocentro (ISO 1) se ubicó en el encéfalo (Detrás de la hipófisis o la línea media antero-posterior), el segundo (ISO 2) a nivel superior de las vértebras (T5-T6) y el tercero (ISO 3) a nivel inferior de las vértebras (L2-L3). Cada isocentro se separó respecto al otro por una distancia de 27 cm (entre ISO 1- ISO 2) y 25 cm (entre ISO 2- ISO 3). Y entre ellos se originaron 2 regiones de superposición de arcos con longitudes de 11 cm y 12 cm. La configuración de los arcos se muestra en la figura 5 (b). Se utilizaron dos arcos coplanares con direcciones opuestas de rotación en sentido horario (CW) y antihorario (CCW), para irradiar el encéfalo y columna cervical. Un arco (CW) para irradiar la columna cervical-dorsal y otro arco (CCW) para la columna dorsal- lumbar.

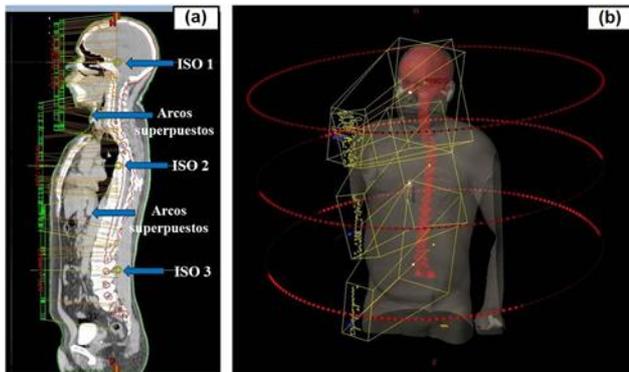


Figura 5. (a) plano sagital donde se representa la localización de los isocentros en diferentes partes de *PTV* (ICE) (Detrás de la hipófisis, T5, L3) y las regiones de superposición de los arcos y (b) Configuración de los arcos por cada isocentro y sus respectivas angulaciones de colimador en un plan de tratamiento realizado para paciente simulado en posición prono.

Para prevenir que el haz de radiación ingresara al Volumen Blanco de Planificación “*PTV* (ICE)” a través de los brazos y los hombros, se utilizaron dos sectores de restricción del arco (parte del arco donde la tasa de dosis se reduce a cero) por cada arco del canal espinal, con las siguientes restricciones desde 230° a 290° y de 70° a 130°. Para minimizar los efectos de transmisión entre las Multilaminas y que los campos no estuvieran muy inclinados en las regiones de superposición, el ángulo del colimador se alternó a 5° para los arcos (CW) y a 355° para los arcos (CCW). Todos los arcos tuvieron un rango de rotación del Gantry de 181° a 179° y fueron optimizados en un sólo plan de tratamiento. Se

emplearon como estrategias de optimización las restricciones Dosis-Volumen al Volumen Tumoral Clínico “*CTV* (ICE)”, Volumen Blanco de Planificación “*PTV* (ICE)”, *PTV* (espinal), “*CTV* (encéfalo)”, “*CTV* (espinal)”, Órganos a Riesgo (OAR) y a la estructura artificial (tabla 1). Además, se activó la herramienta de Objetivo de Tejido Normal (NTO) implementada en el Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) Eclipse para reducir la dosis fuera del “*PTV* (ICE)”. Después de haber optimizado los planes se hizo el cálculo de la distribución de dosis mediante el Algoritmo Analítico Anisotrópico (AAA).

Tabla 2. Protocolo de Planificación para la Irradiación Cráneo-espinal (ICE) encontrado en este estudio.

<b>Posición:</b> Prono	
<b>“CTV (ICE)” [ “CTV (Cerebro)” + “CTV (Espinal)” ]</b>	
0.6 cm	C1 hasta borde inferior de S2+ 0.6 cm (Incluyendo los ganglios espinales)
<b>“PTV (ICE)”:</b> “CTV (ICE)” + 0.5 cm	
<b>Dosis prescrita (Gy)/ por fracción (Gy):</b> 36.0/ 1.8	
<b>N° de Planes:</b> 1	
<b>N° de Isocentros:</b> 3	
<b>Localización de los Isocentros</b>	
ISO 1	Detrás de la hipófisis
ISO 2	T6
ISO 3	Mitad de L3
<b>Distancia entre los isocentros (cm)</b>	
ISO1-ISO2	27.0
ISO2-ISO3	26.0
<b>Longitud de superposición de los arcos (cm)</b>	
ISO1-ISO2	13.5
ISO2-ISO3	13.5
<b>N° total de Arcos</b>	
ISO 1	2
ISO 2	1
ISO 3	1
<b>Ángulos del Gantry (Inicial- Final) por isocentro (°)</b>	
ISO 1	181-179/ 179-181
ISO 2	181-179
ISO 3	179-181
<b>Rango de restricción del arco (°)</b>	
ISO 1	NO
ISO 2	230- 290/ 70- 130
ISO 3	130- 70/ 290- 230
<b>Ángulos del colimador por isocentro (°)</b>	
ISO 1	5/ 355
ISO 2	5
ISO 3	355
<b>Ángulos de la camilla por isocentro (°)</b>	
ISO 1	0
ISO 2	0
ISO 3	0

2.5 Evaluación de los Planes de Tratamiento

La evaluación cuantitativa de los planes de Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (RTC-3D), Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) y Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) se realizó mediante el análisis de los Histogramas Dosis - Volumen (HDV) del Volumen Blanco de Planificación “*PTV* (ICE)” y los Órganos a Riesgo (OAR). Los parámetros dosimétricos evaluados para el “*PTV* (ICE)” incluyen: la dosis media, la dosis máxima (D<sub>2</sub> %), la dosis mínima (D<sub>98</sub>%), el volumen que recibe el 95 % (V<sub>95</sub> %) y el volumen que recibe el 107 % (V<sub>107</sub> %) de la dosis prescrita. El Índice de Conformidad (IC) y el índice de Homogeneidad (IH) de la dosis dentro del “*PTV* (ICE)” en cada plan se calculó en términos de IC (RTOG) (16), IC (Paddick) (17), mIH (Yoon) (18) e

IH (ICRU 83) (19), los cuales se determinaron con las ecuaciones 3, 4, 5 y 6.

$$IC_{(RTOG)} = \frac{V_{IP}}{V_{PTV}} \quad (3)$$

$$IC_{(Paddick)} = \frac{V_{PTV} \cap V_{IP}}{V_{PTV}} \times \frac{V_{PTV} \cap V_{IP}}{V_{IP}} \quad (4)$$

$$mIH_{(Yoon)} = \frac{D_{5\%} - D_{95\%}}{D_{med}} \quad (5)$$

$$IH_{(ICRU 83)} = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}} \quad (6)$$

Dónde:  $V_{IP}$ , es el Volumen de la Isodosis de Prescripción;  $V_{PTV}$ , es el Volumen del "PTV (ICE)";  $V_{PTV} \cap V_{IP}$ , el Volumen de intersección entre el Volumen del "PTV (ICE)" y el de la Isodosis de Prescripción (IP);  $D_{5\%}$ ,  $D_{2\%}$ ,  $D_{98\%}$  y  $D_{95\%}$ , es la dosis que recibe el 5 %, 2 %, 98 % y 95 % del Volumen del "PTV (ICE)".

Para todos los Órganos a Riesgo (OAR) se reportó la dosis media, excepto para cristalino, ojos y tiroides que también se consideró la dosis máxima. Así mismo, se evaluó el  $V_{5}$ ,  $V_{20}$  para los pulmones y el  $V_{30}$  y  $V_{25}$  para corazón. Para examinar más a fondo la calidad de los planes de tratamiento y comprobar la presencia de regiones sobre-dosificadas en la piel se calculó la dosis máxima, el volumen que recibe el 95 % ( $V_{95\%}$ ) y 107 % ( $V_{107\%}$ ) de la dosis prescrita.

### 2.6 Garantía de Calidad de los Planes de Tratamientos

Para conocer la dosis puntual en algunas de las 5 cavidades donde se insertan las dos cámaras de ionización es necesario disponer previamente de una imagen radiológica del maniquí *IMRT* universal. Para ello, el maniquí es escaneado en un Tomógrafo y las imágenes Tomográficas Computarizadas (TC) son almacenadas en un paciente virtual dentro del Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) (figura 6).

Una vez aprobado el plan de tratamiento, los campos y/o arcos son exportados a este maniquí y la estimación de la dosis se realiza en planes separados por cada isocentro. Al finalizar el cálculo es menester visualizar que los dos puntos de medición seleccionados no estén en regiones de alto gradiente de dosis, en caso de estarlo se desplaza la distribución y se realiza nuevamente la estimación de la dosis. Una vez logrado que estos puntos se encuentren en una región de bajo gradiente tal como lo muestra la figura 7, se registra la dosis obtenida en el punto efectivo de cada cámara y las coordenadas isocéntricas (x,y,z) respectivas de los campos y/o arcos. Seguidamente se aprueba el plan de tratamiento y se adjunta a la consola de control del equipo.

En el Acelerador Lineal (AL) se centró el maniquí con la retícula de campo, tamaño de campo de 40x40 cm<sup>2</sup> y una distancia fuente superficie de 94 cm. Una vez insertadas y conectadas las cámaras de ionización al electrómetro y al punto de medición, se incrementó el voltaje de operación del electrómetro hasta alcanzar ± 400 Voltios (voltaje de operación de

las cámaras). Luego de estabilizar el sistema, se inicia las mediciones determinando por cada cámara de ionización el factor de calibración de campo (Kcross).

Este factor multiplicado por el factor de calibración de la cámara y las lecturas de cargas colectadas en ella [modificadas por las respectivas magnitudes de influencia ambientales (20) (ecuación 7)], permiten conocer la dosis puntual estimada. Finalmente, dicho valor se compara con el calculado en el Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) de acuerdo a la ecuación 8.

$$k_{TP} = \frac{(273,2+T) P_0}{(273,2+T_0) P} \quad (7)$$

Dónde:  $T$  y  $P$  son los valores de temperatura y presión en la sala de tratamiento.  $T_0$  y  $P_0$  son los valores de referencia respectivos cuando las cámaras fueron calibradas.

$$D(\%) = \left( \frac{D_m}{D_c} - 1 \right) \times 100\% \quad (8)$$

Siendo  $D(\%)$ , la diferencia porcentual de dosis;  $D_m$ , la dosis estimada en el maniquí y  $D_c$ , la dosis calculada en el SPT.

El criterio de tolerancia seleccionado en nuestro caso fue ± 5 %.

### 3. Resultados

En la tabla 3 se muestran los resultados de los parámetros dosimétricos evaluados al Volumen Blanco de Planificación "PTV (ICE)" y la piel para 15 pacientes seleccionados en este estudio. Se evidencia que en los planes de Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) y Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) la dosis media administrada al Volumen Blanco de Planificación "PTV (ICE)" tiende a ser igual a la dosis prescrita. Asimismo, la dosis mínima y máxima expresada en términos  $D_{98\%}$  y  $D_{2\%}$  son más aceptables para dichos planes. De igual manera, el volumen del "PTV (ICE)" que recibe el 95 % de la dosis prescrita es mayor en los planes de *IMRT* seguidos por los de *VMAT*, siendo menor el volumen de este recibiendo el 107 % de la dosis prescrita en las técnicas de intensidad modulada. En relación a la piel todos los parámetros se reducen significativamente en los planes de *VMAT* ocupando el segundo lugar los planes de *IMRT*.

En la figura 8 (a) se muestran los valores de los Índices de Conformidad (IC) de dosis en el "PTV (ICE)" en función de los planes de tratamiento. Se aprecia que tanto el IC (RTOG) como el IC (Paddick) están dentro del rango de tolerancia para las tres modalidades de planificación, siendo más favorables los índices alcanzados en los planes realizados con la técnica *VMAT* con un valor promedio de 1.00 y 0.89, lo cual indica que hay mayor conformidad de la dosis dentro del "PTV (ICE)" en estos planes.

En la figura 8 (b) se representa los valores de los Índices de Homogeneidad (IH) de dosis dentro del "PTV (ICE)" en función de los planes de tratamiento. En términos generales, se observa que los planes realizados con la técnica de *VMAT* e *IMRT*

proporcionan mayor homogeneidad de dosis con valores promedios alcanzados en el mIH (Yoon) de 0.11 y 0.13, mientras que los valores para el IH (ICRU 83) fue 0.15 respectivamente, siendo estos valores aceptables al compararlo con los obtenidos en los planes de RTC-3D.

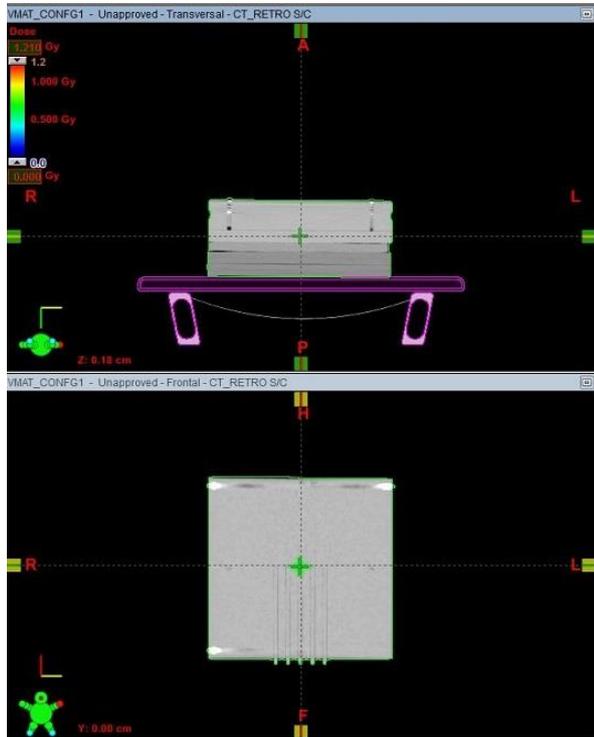


Figura 6. Imágenes TC del maniquí IMRT universal visto en el Sistema de Planificación de Tratamiento Eclipse v10.0 de la Varian Medical Systems.

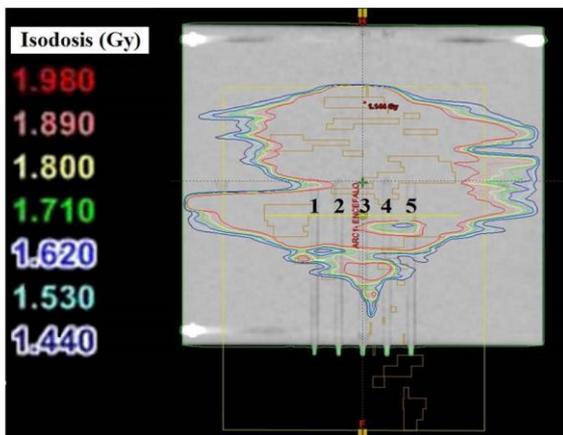


Figura 7. Los puntos de evaluación seleccionados 3 y 4 se encuentran dentro de una región de bajo gradiente de dosis en un plan de verificación para los arcos del encéfalo de uno de nuestro paciente.

Respecto a la dosis máxima y media que reciben los OAR a nivel del encéfalo y el cuello desde cada plan y técnica de tratamiento. La figura 9 (a) muestra que la dosis máxima recibida por los ojos, cristalinos y la tiroides están por debajo de la dosis tolerancias; y su reducción es significativa en los planes de VMAT seguidos por los planes de IMRT en comparación a los planes de RTC-3D.

En relación con la dosis media que reciben los OAR (nervios ópticos, esófago, corazón, pulmones, hígado, estomago, intestino delgado y riñones), en

embargo, estas se incrementan o disminuyen en algunos OAR dependiendo de la técnica. las figuras 9 (b) y 9 (c) se observa que en las tres modalidades de planificación la dosis recibida por los OAR está dentro de la dosis de tolerancia, sin

Tabla 3. Parámetros dosimétricos evaluados en el "PTV (ICE)" y la piel en los planes de tratamiento realizados con las técnicas de RTC-3D, IMRT y VMAT. Los valores son el promedio de los 15 pacientes seleccionados en este estudio.

"PTV (ICE)"		
Técnica	D <sub>med</sub> (Gy)	D <sub>med</sub> (%)
RTC-3D	37.94±0.63	105.39±1.75
IMRT	37.07 ±0.44	102.97±1.22
VMAT	36.76±0.58	102.10±1.60
Técnica	D <sub>98</sub> % (%)	D <sub>2</sub> % (%)
RTC-3D	92.27±0.53	115.53±0.96
IMRT	96.87±0.76	112.81±1.15
VMAT	93.68±0.70	108.67±0.79
Técnica	V <sub>95</sub> % (%)	V <sub>107</sub> % (%)
RTC-3D	95.34±0.21	41.90±1.20
IMRT	97.03±0.42	13.86±0.92
VMAT	96.66±0.33	6.37±1.30
Piel		
Técnica	D <sub>máx</sub> (Gy)	D <sub>máx</sub> (%)
RTC-3D	50.94±0.37	141.5±1.03
IMRT	42.81±1.35	118.92±3.75
VMAT	41.65±0.54	115.69±1.50
Técnica	D <sub>med</sub> (Gy)	D <sub>med</sub> (%)
RTC-3D	7.95±0.12	22.08±0.39
IMRT	7.90±0.10	21.94±0.28
VMAT	7.55±0.35	20.98±0.98
Técnica	V <sub>95</sub> % (%)	V <sub>100</sub> % (%)
RTC-3D	8.77±0.53	7.92±0.72
IMRT	6.84±0.47	5.87±0.30
VMAT	5.59±0.70	4.29±0.90

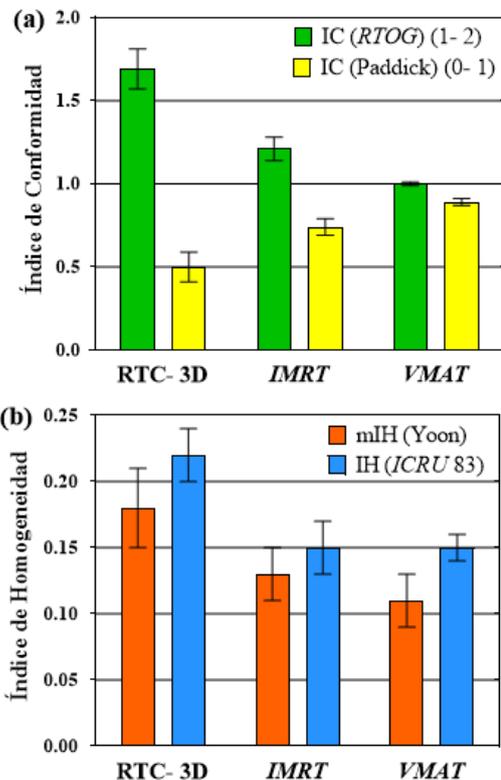


Figura 8. Índices de Conformidad (IC) e Índices de Homogeneidad (IH) de dosis en el "PTV (ICE)" en función de los planes de tratamiento realizados con RTC-3D, IMRT y VMAT, los valores son el promedio de los 15 pacientes seleccionados en este estudio.

La dosis que recibe los pulmones, estómago y riñones se incrementa en los planes de *VMAT* e *IMRT*, aunque con estos planes se logra reducir la dosis en los nervios ópticos, esófago, corazón y el hígado, siendo más evidente la protección brindada para estos órganos (Excepto nervios ópticos) y para el intestino delgado por los planes de *IMRT*.

En la figura 10 se muestra los resultados de otros parámetros dosimétricos evaluados en pulmones ( $V_5$  y  $V_{20}$ ) y en el corazón ( $V_{30}$  y  $V_{25}$ ). Se aprecia que tanto en los planes de *VMAT* como en los planes de *IMRT*, se incrementa el volumen del pulmón que recibe bajas dosis mientras que al mismo tiempo se reduce el volumen de este que alcanza altas dosis. Además, con estas técnicas los parámetros evaluados en corazón son más favorables en comparación a *RTC-3D*.

En cuanto a las Unidades Monitor (UM) total para la entrega de una dosis por fracción de 1.8 Gy para cada plan de tratamiento, se tiene que estas se incrementan considerablemente en *IMRT*, seguidos por los planes de *VMAT* al compararla con las de *RTC-3D*. Dicho de otra manera, las UM totales en los planes de *IMRT* son  $1695 \pm 38$ , mientras que para los planes de *VMAT* oscilan entre  $1022 \pm 17$  respectivamente y finalmente para los planes de *RTC-3D*  $638 \pm 9$  UM.

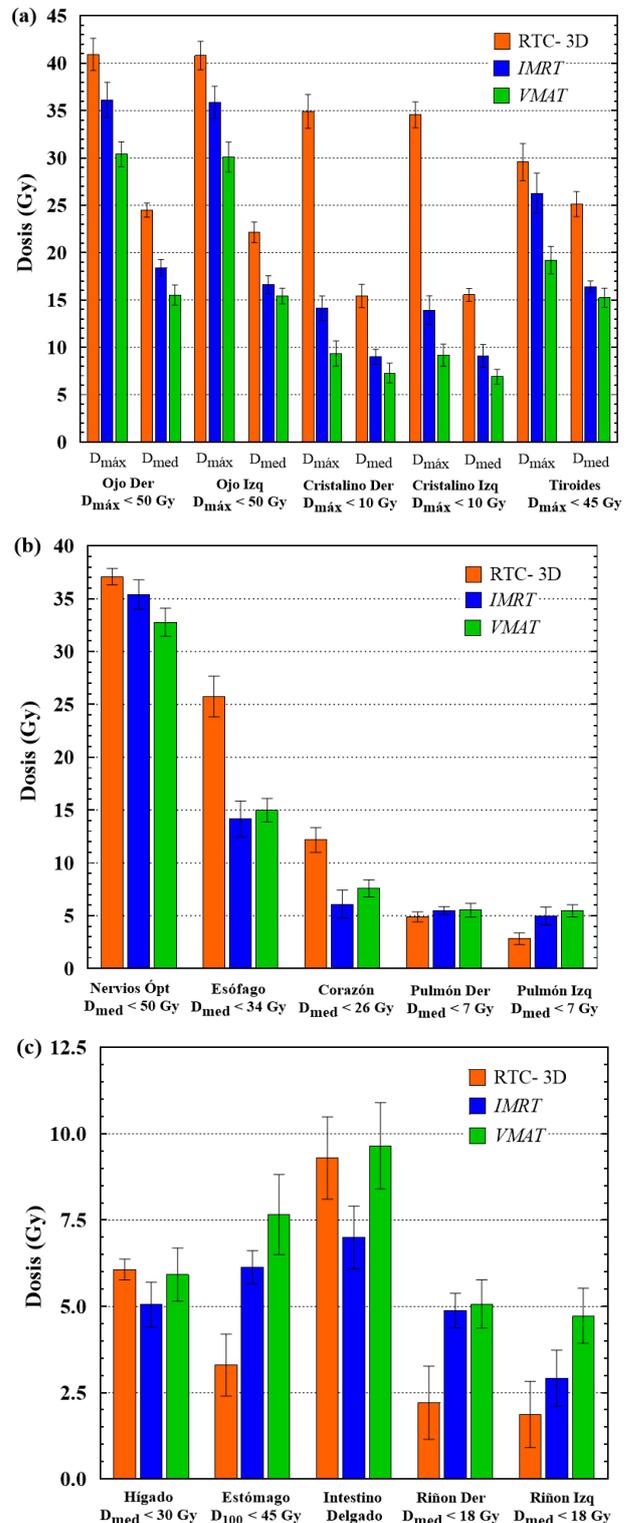
Para validar el uso clínico de la técnica *VMAT* se seleccionaron dos planes de tratamiento y se evaluó la distribución de dosis en un maniquí de PMMA y arreglo de cámaras de ionización, a fin de determinar la diferencia porcentual de dosis entre la calculada con el sistema de planificación de tratamiento y la estimada en el maniquí. Las diferencias porcentuales de dosis por cada arco de tratamiento en los dos puntos de medición seleccionados (Cámara de ionización Semiflex 1169 y 0157) se encontraron dentro del rango de tolerancia establecido  $\pm 5\%$ .

**4. Discusión**

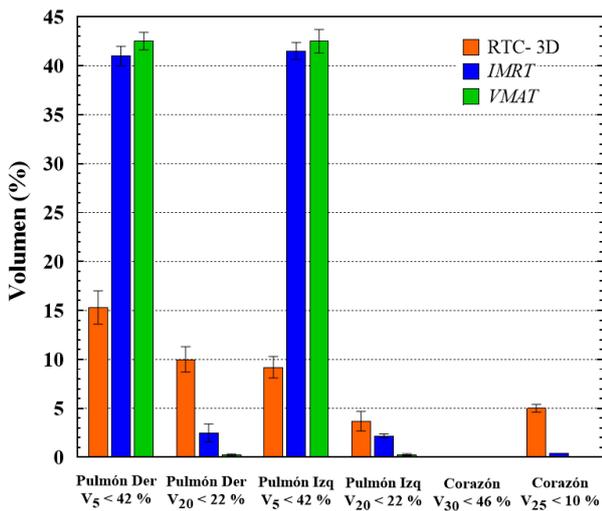
En este estudio se demostró que el uso de técnicas tales como Radioterapia de Intensidad Modulada (*IMRT*) y Arcoterapia Volumétrica Modulada (*VMAT*) para la planificación de la ICE se logra homogeneizar la dosis dentro del Volumen Blanco de Planificación “*PTV* (ICE)” y reducir las incertidumbres geométricas presentada con la técnica de Radioterapia Conformada en 3 Dimensiones (*RTC-3D*). Teniendo en cuenta que, la mayor conformidad de la dosis dentro del “*PTV* (ICE)” como se muestra en las figuras 8 y 11 se alcanzan en los planes de *VMAT* con valores promedios de los IC (*RTOG*) de 1.00 y del IC (Paddick) de 0.89. Luego, se encuentran los planes de *IMRT* con valores promedios de 1.21 y 0.74 respectivamente y finalmente los planes de *RTC-3D* con valores de 1.69 y 0.50.

De igual manera, se observa que, la mayor homogeneidad de la dosis dentro del “*PTV* (ICE)” se logra en los planes de *VMAT* con valores promedios del mIH (Yoon) de 0.11 y el IH (*ICRU 83*) de 0.15. Es importante destacar que, los planes de *IMRT* obtuvieron valores aceptables de los Índices de Homogeneidad (IH) al compararlo con los valores obtenidos en los planes de *RTC-3D*.

Cabe señalar, que nuestros resultados están en línea con los de Fogliata A, et al.<sup>1</sup> cuyos valores obtenidos de los IC (*RTOG*) para los planes de *VMAT* estuvieron entre 1.00- 1.13. Así mismo están acorde con los de Srivastava R, et al. (21) dado que los valores encontrados por ellos en los planes de *VMAT* para el IC (*RTOG*) e IC (Paddick) fueron 1.10 y 0.88, mientras que para los planes de *RTC-3D* los valores obtenidos fueron 2.56 y 0.51.



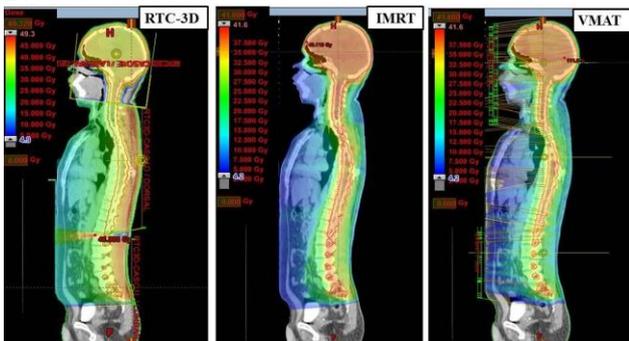
**Figura 9.** Dosis Máxima y media que reciben los OAR en los planes de tratamiento realizados con la técnica de *RTC-3D*, *IMRT* y *VMAT*. Los valores corresponden al promedio para los 15 pacientes seleccionados en este estudio.



**Figura 10.** Otros parámetros dosimétricos evaluados en pulmones y en corazón en los planes de tratamiento realizados con la técnica de RTC-3D, IMRT y VMAT para los 15 pacientes seleccionados en este estudio.

Empleando los métodos propuestos por Zheng W, et al.(9) de superponer los campos/ arcos dentro de un mismo plan de tratamiento, como se representa en la figura 11, no solo en los planes de VMAT e IMRT se logró homogeneizar la dosis en todo el “PTV (ICE)” sino también eliminar las regiones sub-dosificadas y sobre-dosificadas originadas dentro y fuera de este en los planes de RTC-3D. De igual manera, reducir la dosis en la piel minimizando el riesgo de la aparición de fibrosis, la cual se origina de acuerdo a lo establecido en el ICRP 118 cuando la piel alcanza una dosis  $\geq$  a 40 Gy. Por otra parte, debe tomarse en consideración la dosis media que recibe la región bucal con dichas técnicas, en los planes de IMRT estas oscilan a 9.84 Gy, en cambio en los planes de VMAT suele estar a 10.3 Gy esto conllevaría a originar en el paciente mucositis oral (22).

En la tabla 4 se compararán los resultados obtenidos de la dosis media que reciben los OAR en la técnica de VMAT con los encontrados por Fogliata A, et al.<sup>1</sup>. De forma general, se observa que nuestros resultados para los OAR; ojos, cristalinos, nervios ópticos, tiroides y corazón son mayores a los alcanzados por ellos, dado a que las diferencias porcentuales encontradas oscilan entre 2.01 a 42.79 %. Aunque, para el esófago, pulmones, hígado y riñones las dosis medias reportadas en este estudio son menores con diferencias porcentuales entre -21.88 a -50.00 %.



**Figura 11.** Distribución de la dosis dentro del PTV (ICE) y los OAR en un plano sagital de paciente simulado en posición prono brazos abajo, empleando las tres modalidades de planificación.

Por otra parte, Srivastava R, et al., desarrollaron una técnica para reducir regiones de baja dosis en la irradiación cráneo espinal con *RapidArc* y su comparación dosimétrica con técnicas de RTC-3D. Para su evaluación utilizaron 4 pacientes: dos simulado en posición prono brazos abajo y los otros en supino (21). Sus resultados de la dosis máxima y media que reciben los OAR en los planes de VMAT se muestran en la tabla 5 como el promedio de los 4 pacientes. Se aprecia que nuestros resultados para los ojos, cristalinos, tiroides, esófago, corazón y riñones son menores a los reportados por ellos con diferencias porcentuales que oscilan entre -2.31 a -49.88 %. Sin embargo, las dosis alcanzadas en hígado y pulmones son mayores en nuestro estudio con diferencias porcentuales de 1.75 % y 15.31 %, respectivamente.

**Tabla 4.** Comparación de los resultados obtenidos de la dosis media que reciben los OAR en los planes de tratamiento realizados con la técnica VMAT con los encontrados por Fogliata, et al., para una dosis prescrita de 36 Gy.

OAR	Fogliata, et al. <sup>1</sup>	Este estudio	Diferencia porcentual (%)
Ojos	11.40 Gy	15.50 Gy	35.96
Cristalinos	5.60 Gy	7.10 Gy	26.79
Nervios ópticos	22.90 Gy	32.70 Gy	42.79
Tiroides	14.90 Gy	15.20 Gy	2.01
Esófago	19.20 Gy	15.00 Gy	-21.88
Pulmones	11.00 Gy	5.50 Gy	-50.00
Corazón	7.10 Gy	7.60 Gy	7.04
Hígado	9.70 Gy	5.90 Gy	-39.18
Riñones	8.50 Gy	4.90 Gy	-42.35

**Tabla 5.** Comparación de la dosis máxima y media que reciben los OAR en los planes de tratamiento realizados con la técnica de VMAT con los encontrados por Srivastava R, et al.<sup>21</sup>. Los valores de dosis reportados en cada estudio corresponden al promedio obtenido de la suma del número de pacientes seleccionados respectivamente y para una dosis prescrita de 36 Gy.

OAR	Parámetros	Srivastava R, et al. <sup>21</sup>	Este estudio	Diferencia porcentual (%)
Ojo Der.	D <sub>max</sub> (Gy)	38.08	30.72	-19.33
	D <sub>med</sub> (Gy)	25.15	14.56	-42.11
Ojo Izq.	D <sub>max</sub> (Gy)	36.58	31.44	-14.05
	D <sub>med</sub> (Gy)	23.18	15.39	-33.61
Cristalino Der.	D <sub>max</sub> (Gy)	14.30	9.93	-30.56
Cristalino Izq.	D <sub>max</sub> (Gy)	14.43	9.62	-33.33
Tiroides	D <sub>max</sub> (Gy)	26.50	18.53	-30.08
	D <sub>med</sub> (Gy)	21.28	14.27	-32.94
Esófago	D <sub>med</sub> (Gy)	21.83	16.88	-22.68
Corazón	D <sub>med</sub> (Gy)	9.08	8.87	-2.31
	D <sub>med</sub> (Gy)	6.28	6.39	1.75
Hígado	D <sub>med</sub> (Gy)	4.90	5.65	15.31
	V <sub>5</sub> (%)	48.10	44.23	-8.05
Pulmones	V <sub>20</sub> (%)	0.50	0.52	4.00
	D <sub>med</sub> (Gy)	8.30	4.32	-47.95
Riñón Der.	D <sub>med</sub> (Gy)	8.00	4.01	-49.88
Riñón Izq.	D <sub>med</sub> (Gy)	8.00	4.01	-49.88

### 5. Conclusiones

En esta investigación proporcionamos un protocolo de planificación para la ICE empleando la técnica de VMAT e ilustramos la capacidad que tiene VMAT para generar planes de tratamiento altamente conformados y homogéneos, y reducir la dosis máxima y media que reciben los ojos, cristalinos y

tiroides, al comparar los resultados con los obtenidos en los planes de IMRT y RTC-3D. De igual manera, en los planes de VMAT, se reduce la dosis media que reciben los nervios ópticos, esófago, corazón y el hígado (siendo más evidente la protección brindada para estos OAR (Excepto nervios ópticos) y el intestino delgado por los planes de *IMRT*). Finalmente, la dosis media que reciben los pulmones, estomago, intestino delgado y riñones se incrementa tanto para VMAT como para IMRT, aunque los resultados encontrados están dentro de la dosis de tolerancia.

## 6. Referencias

- Fogliata A, Bergström S, Cafaro I, Clivio A, Cozzi L, Dipasquale G et al. Cranio-spinal irradiation with volumetric modulated arc therapy: A multi-institutional treatment experience. *Radiotherapy and Oncology* 2011; 99: 79–85. Doi: 10.1016/j.radonc.2011.01.023.
- AMERICAN BRAIN TUMOR ASSOCIATION. Meduloblastoma. COPYRIGHT ABTA; 2014.
- Louis D, Perry A, Reifenberger G, Von Deimling A, Branger D, Cavenee W et al. The 2016 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary. *Acta Neuropathol (Springer)* 2016; 131: 803-20.
- Badal M. Meduloblastoma del adulto. En: Aguerri A. Manual Práctico de Oncología Radioterápica, España: SEOR; 2013. p. 251-55.
- Roberts K, Ruiz F, Ruan L. Tumores Pediátricos. En: Urdaneta N, Vera A, Peschel R y Wilson L. Radioterapia Oncológica. 2da Edición, Caracas: Disinlimed; 2009. p.1268-75.
- Athuyaman H, Mayilvaganan A, Singh D. A simple planning technique of craniospinal irradiation in the eclipse treatment planning system. *Journal of Medical Physics* 2014; 39: 251-58.
- Halperin E. Impact of radiation technique upon the treatment for medulloblastoma. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1996; 36: 233-39.
- Court L, Balter P, Mohan R. Principles of IMRT. En: Nishimura Y and Komaki R. Intensity Modulated Radiation Therapy. Clinical Evidence and techniques. New York: Springer; 2015. p. 15-42.
- Zheng W, Wei J, Yuanming F, Yang G, Zheng C, Bin S, Yu G. A simple approach of three isocenter IMRT planning for Craniospinal irradiation. *Radiation Oncology* 2013; 8: 1-8.
- ICRU. Prescripción, Registro y Elaboración de informes en la terapia con haces de fotones, Reporte N° 62 (Suplemento del ICRU Report 50) Edición Española. España: SEFM; 1999.
- Buchsbaum J, Paulino A. Pediatric Central Nervous System Tumors. In: Lee N, Lu J. Target Volume Delineation and Field Setup: A Practical Guide for Conformal and Intensity-Modulated Radiation Therapy. Nueva York: Springer; 2013. p.295-306.
- Starno M, Romero J. Aspecto Técnicos de la Radioterapia Externa. En: Urdaneta N, Vera A, Peschel R, Wilson L. Radioterapia Oncológica. 2da Edición, Caracas: Disinlimed; 2009. p.339-41.
- Chen Z, Nath R, Romero J. Radioterapia de Intensidad Modulada, Principios Físicos. En: Urdaneta N, Vera A, Peschel R, Wilson L. Radioterapia Oncológica. 2da Edición, Caracas: Disinlimed; 2009. p.301.
- Emami B. Tolerance of Normal Tissue to Therapeutic Radiation. *Reports of Radiotherapy and Oncology* 2013; 1: 35-44.
- Marks B, et al. QUANTEC Summary: Approximate Dose/Volume/Outcome Data for Several Organs Following Conventional Fractionation. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys* 2010; 76: S15-S18.
- Shaw E, Kline R, Gilin M, Souhami L, Hirschfeld A, Martin L. Radiation Oncology Group: radiosurgery quality assurance. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1993; 1231-39.
- Ian P, Lippitz B. A simple scoring ratio to index the conformity of radiosurgical treatment plans. *J. Neurosurg (Suppl 3)* 2000; 93: 219-22.
- Yoon M, Park SY, Shin D, Lee SB, Pyo HR, Kim DY et al. A new homogeneity index based on statistical analysis of the dose- volume histogram. *J Appl Clin Med Phys* 2007;8:917.
- ICRU. Prescribing, Recording, and Reporting photon-beam intensity modulated radiation therapy (IMRT). Report 83. Bethesda, MD.: International Commission on Radiation Units and Measurements 2010; 10; 34-35.
- IAEA. Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos, Colección de informes técnicos N° 398. Austria: OIEA; 2005. p. 57.
- Srivastava R, Saini G, Sharma P, Chomal M, Agarwal A, Nangia S, Garg M. A technique to reduce low dose región for craniospinal irradiation (CSI) with RapidArc and its dosimetric comparison with 3D conformal technique (3DCRT). *Journal of Cancer Research and Therapeutics* 2015; 11: 488-91. Doi: 10.4103/0973-1482.144556.
- Stewart FA, Akleyev AV, Hauer-Jensen M, Hendry JH, Kleiman NJ, MacVittie TJ et al. ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, ICRP Publication 118. Nueva York: Elsevier; 2012. p.70, 89-90.

## Contacto:

M.Sc. Mariangel del Carmen Rodríguez Leones (Físico Médico)  
IVIC, Carretera Panamericana, km 11, Altos de Pipe, Estado Miranda, Venezuela. E-mail: [mariangelleoness@gmail.com](mailto:mariangelleoness@gmail.com)