

LA RADIOTERAPIA Y SU PLANIFICACIÓN: CÁNCER DE PRÓSTATA

MIGUEL ÁNGEL DÍEZ GALLEGO

FÍSICA DE LOS SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO, TRATAMIENTO Y
PROTECCIÓN EN CIENCIAS DE LA SALUD

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

BLOQUE I- GENERAL

1. <u>RADIOTERAPIA</u>	6
1.1. Conceptos.....	6
1.2. Tipos de radioterapia.....	9
1.3. Profesionales en radioterapia.....	11
2. <u>EQUIPOS DE RADIOTERAPIA</u>	12
2.1. TAC (Tomografía Axial Computerizada).....	12
2.2. LINAC de electrones.....	13

BLOQUE II – TRATAMIENTO DEL CÁNCER DE PRÓSTATA

3. <u>ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DE LA PRÓSTATA</u>	16
4. <u>FASES DEL TRATAMIENTO</u>	18
4.1. Simulación.....	18
4.1.1. Características de un TAC de planificación.....	18
4.1.2. Sistemas de inmovilización.....	20
4.2. Planificación del tratamiento.....	22
4.2.1. Definición de volúmenes.....	22
4.2.2. Configuración de parámetros de irradiación.....	24
4.2.3. Cálculo de la distribución de dosis.....	28
4.3. Sesiones de tratamiento.....	31
4.4. IMRT, arcos y planificación inversa.....	33
4.5. Efectos Secundarios.....	34
4.6. Otras opciones de tratamiento.....	35

BLOQUE III – PRECAUCIONES Y CONTROLES DE CALIDAD

5. <u>PROTECCIÓN RADIOLÓGICA</u>	40
6. <u>CONTROLES DE CALIDAD</u>	42
7. <u>CONCLUSIÓN</u>	45
8. <u>AGRADECIMIENTOS</u>	46
9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	47

-INTRODUCCIÓN-

La radioterapia se ha convertido en los últimos años en un elemento clave para la lucha contra el cáncer. Gracias a los últimos avances científicos dirigidos al desarrollo de equipos de diagnóstico y tratamiento a través de radiaciones ionizantes, se ha logrado que la radioterapia sea el método más eficaz para la cura de tumores y tratamientos paliativos.

La sustitución de las antiguas bombas de Cobalto-60 por los nuevos aceleradores lineales de electrones (LINAC), conlleva un mayor control sobre la radiación que se le aplica al paciente, mientras que la mejora de la tecnología y software de la tomografía axial computerizada (TAC) hace que las planificaciones de los tratamientos sean mucho más precisas.

Según la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), en 2010 en España existen 15,0 unidades de TAC instaladas en hospitales por millón de habitantes, por debajo de la media de los países que conforman la propia OCDE que se sitúa en 22,6. En cuanto a LINACs, según los datos obtenidos de la Sociedad Española de Oncología Radioterápica (SEOR), en 2013 existen 213 en toda España, siendo la Comunidad de Madrid con 38, Cataluña con 34 y Andalucía con 31, las comunidades autónomas con mayor número. Si a ello se suman las 23 unidades de Cobalto que siguen en uso, se alcanza una cifra de 5,4 unidades de radioterapia por millón de habitantes, por debajo de las 6 que recomiendan los expertos, y muy lejos de las 8,7 de Bélgica; 9,4 de Suiza ó 9,7 de Dinamarca.

En este trabajo de fin de máster, me he centrado en el caso del cáncer de próstata, uno de los cánceres más comunes que existen junto con el de mama. El tumor de próstata afecta a multitud de varones y, pese a tener un índice de mortalidad relativamente bajo, son muchos los hombres que se decantan por la radioterapia para su eliminación. En 2012 en España se han registrado 25.231 nuevas incidencias de cáncer

de próstata (57,2 por 100.000 habitantes), según la Sociedad Española de Oncología Médica.

La intención de este trabajo es seguir y explicar las distintas etapas de las que se compone un tratamiento real completo de radioterapia, así como ver otras tareas que desempeñan los radiofísicos en un hospital, con el fin de aprender las técnicas con visión a una posible salida profesional. Para ello, he acudido al Hospital Campo Grande de Valladolid que cuenta con una unidad TAC y dos de LINAC. Allí he contado con la ayuda y la colaboración de Antonio Ruiz Bueno y Carlos Andrés Rodríguez, equipo de radiofísicos del hospital, quienes me han guiado a través de una sesión de planificación de radioterapia completa, enseñado las instalaciones y mostrado sesiones de simulación en TAC y tratamiento en LINAC a lo largo de mis visitas.

El trabajo está dividido en tres bloques:

En el primero de ellos, se expone de forma básica y superficial los distintos conceptos generales necesarios para entender la radioterapia. Términos médicos como cáncer; conceptos físicos como radiaciones ionizantes o dosis; y descripciones de tipos, equipos o personal que componen la radioterapia, es lo que aparece en el Bloque I, con la mera intención de situarse en el mundo de la radioterapia.

El segundo bloque es específico del cáncer de próstata. En él, se habla de la anatomía de la próstata y se trata todo el tratamiento de un paciente con tumor de próstata, incluyendo la parte más importante del trabajo del radiofísico en el hospital: la planificación de la radioterapia.

En el tercero y último se repasa, de forma muy breve, otras tareas que desempeñan los radiofísicos dentro de las instalaciones hospitalarias.

Todos los datos e imágenes que se muestran durante el tratamiento en el trabajo, han sido facilitados por el Hospital Campo Grande de Valladolid y corresponden a un paciente de tumor de próstata real, cuyo nombre se ha borrado para respetar la confidencialidad.

-BLOQUE I-
GENERAL

1. RADIOTERAPIA

1.1. CONCEPTOS

➤ ¿QUÉ ES UN CÁNCER?

Bajo el nombre de cáncer se engloba todo tipo de enfermedades en las que células anormales comienzan a dividirse sin control y pueden invadir otros tejidos a través del aparato circulatorio o el linfático formándose metástasis. Existen más de 100 tipos de enfermedades distintas que se agrupan bajo el nombre de cáncer y éstas toman el nombre del órgano o las células donde se inicia.

Todos los cánceres tienen su origen en un deterioro o alteración del material genético de las células, que prevalece y produce una mutación que afecta al crecimiento y división normal celular.

En condiciones normales las células se dividen de forma controlada y cuando envejecen o se dañan, mueren y son reemplazadas. En el caso de células cancerosas, este mecanismo está anulado, por lo que éstas se acumularán en una masa formando un tumor, que podrá ser benigno, dando la posibilidad de ser extirpado sin consecuencias; o maligno, en cuyo caso se requieren técnicas terapéuticas más complejas.

En la figura 1, obtenida de la Sociedad Española de Oncología Médica, se muestran las incidencias de cáncer y mortalidad en el año 2012 en España. El número total de nuevos casos en España fue de 196.902, un 0,24% de la población total.

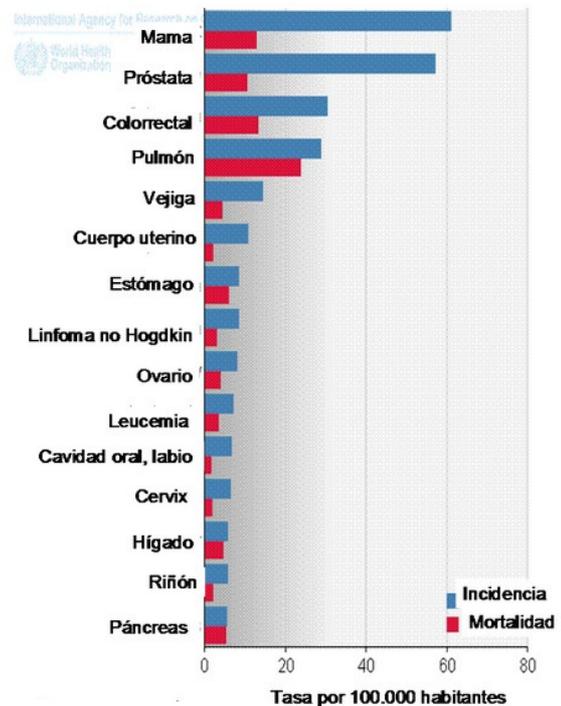
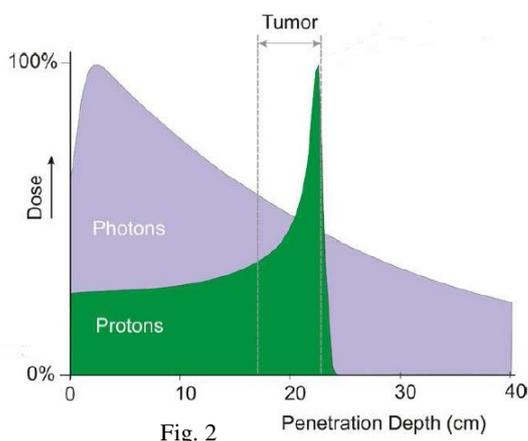


Fig. 1

➤ ¿QUÉ ES LA RADIOTERAPIA?

La radioterapia es el uso médico de las radiaciones ionizantes con el objetivo de tratar el cáncer y tener bajo control o eliminar las células malignas del cuerpo de un paciente. Hoy en día es el sistema de lucha contra el cáncer más usado en todo el mundo.

Son varios los tipos de radiaciones ionizantes que se utilizan en la actualidad en radioterapia: fotones, electrones, protones o iones acelerados, además de los indirectamente ionizantes neutrones. Cada tipo de radiación, y dependiendo de su energía, tiene un poder de penetración diferente, lo que equivale a decir que es distinta la cantidad de energía que va dejando a su paso por el tejido atravesado. En la figura 2



se ve que los fotones llegan más lejos, pero dejan mucha energía al comienzo y más repartida, mientras que partículas con masa grande respecto a los electrones tienen menos alcance y dejan casi toda la energía en su punto final. La representación de la figura 2 muestra las dosis relativas en profundidad en agua, similares al comportamiento en tejido humano.

Las radiaciones ionizantes se encargan de la eliminación de las células tumorales por dos vías:

- Acción directa de la radiación sobre las moléculas de ADN del interior del núcleo celular, donde se producen las ionizaciones de los puentes de hidrógeno que unen las dos cadenas. Esto hace que la célula quede inservible y se destruya.
- Acción indirecta de la radiación, en la que se ionizan moléculas externas al material genético como el agua, pero que se producen radicales libres que acaban dañando el ADN.

➤ DOSIS HABITUALES

La cantidad de radiación absorbida por los tejidos se denomina dosis y, aunque tiene muchas unidades de medida, la más utilizada en el ámbito médico es el Gray (Gy). Un Gy es el equivalente a la absorción de un julio de energía ionizante por kilogramo de material irradiado. Tejidos diferentes toleran distintas dosis, y para acabar con las células de un determinado órgano, se debe sobrepasar ese límite. El límite de órganos como el hígado o los riñones es de 30 Gy y 18 Gy respectivamente.

Para tejidos tumorales, las dosis que se suelen prescribir son muy variadas, para el caso de una próstata por ejemplo, la dosis recomendada sería de 70 a 80 Gy, pero depende de las condiciones del paciente, el grado del tumor, la extensión de órgano afectado...

El principal inconveniente que tiene la radioterapia es que, al radiar tejido tumoral, se daña colateralmente tejido sano que está situado alrededor, por lo que hay que tener mucho cuidado con la dosis que recibe cada órgano y asegurarse de minimizar los daños.

1.2. TIPOS DE RADIOTERAPIA

Existen multitud de variantes que se adecúan en mayor o menor medida a las necesidades del paciente. No todos los casos necesitan la misma dosis de radiación, ni el objetivo buscado es el mismo, incluso en ocasiones se requiere combinar con otros tipos de terapia.

Algunas formas de categorizar el tratamiento son las siguientes:

➤ SEGÚN LA DISTANCIA DE LA FUENTE:

a) Radioterapia Externa

La fuente de irradiación está a cierta distancia del paciente y se llega al tumor a través de haces. De esta manera se puede manejar el ángulo de entrada de la radiación al cuerpo para minimizar la dosis al tejido sano. El método más extendido es el acelerador lineal de electrones, con energías de entre 2 y 18 MeV.

Dentro de este tipo, destaca la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), técnica relativamente nueva de las últimas décadas, en la que se varía la intensidad de los haces de radiación para optimizar la dosis recibida por el tumor.

b) Braquiterapia

Consiste en la colocación de fuentes radiactivas encapsuladas en el interior del paciente cerca de la masa tumoral, donde se va liberando la dosis automáticamente.

➤ SEGÚN LA SECUENCIA TEMPORAL REPECTO A OTROS TRATAMIENTOS:

a) Radioterapia exclusiva

Es el único tipo de tratamiento que recibe el paciente.

b) Radioterapia adyuvante

Se usa como complemento a un tratamiento principal, ya sea quimioterapia o cirugía.

c) Radioterapia sincrónica o concomitante

Se realiza simultáneamente con otro tratamiento como la quimioterapia y se potencian mutuamente.

➤ SEGÚN LA FINALIDAD DE LA RADIOTERAPIA:

a) Radioterapia radical o curativa

Se emplean dosis de radiación altas, cerca de los límites de la tolerancia del tejido, ya que su objetivo es eliminar las células tumorales y acabar con el tumor. Pese que suele conllevar un tratamiento largo, el beneficio de la curación supera el daño ejercido sobre tejidos no tumorales.

b) Radioterapia paliativa

Se emplea en casos en los que el tumor no tiene cura (especialmente en tejido óseo), aplicando una radiación de dosis bajas con el objetivo de eliminar el dolor y los síntomas al paciente.

c) Radioterapia profiláctica

Tras la extirpación quirúrgica de un tumor, se irradia la zona para asegurarse de que no queden restos tumorales.

1.3. **PROFESIONALES EN RADIOTERAPIA**

➤ **Oncólogo (Médico radioterapeuta)**

Médico especialista en oncología responsable de la prescripción del tratamiento, de la supervisión del mismo y de la vigilancia del paciente durante las sesiones. Es el máximo responsable del tratamiento y tiene la última palabra sobre las decisiones a tomar.

➤ **Radiofísico hospitalario**

Licenciado en Física que ha realizado la especialidad de Radiofísica hospitalaria (RFIR). Es el encargado del cálculo y diseño del tratamiento y de la dosimetría que recibe el paciente en cada punto del cuerpo. También es el encargado de la supervisión periódica de los equipos de radioterapia, controles de calidad de los mismos y dosimetría.

➤ **Técnico Especialista en Radioterapia**

Es el responsable del manejo de los equipos de simulación y de radioterapia y el encargado de la ejecución diaria del tratamiento prescrito al paciente. Su función es tratar con el paciente y colocarlo en la posición debida en cada sesión para recibir el tratamiento. Junto con el médico y el radiofísico, son las tres piezas clave que nunca faltan en una clínica de radioterapia.

➤ **Técnico Superior de Mantenimiento**

No forman parte del equipo médico diario. Son los encargados de la revisión de los equipos (periódicamente y en situaciones no programadas), su mantenimiento y la reparación de los mismos. Son Licenciados en Física o Ingenieros contratados por el fabricante.

2. EQUIPOS DE RADIOTERAPIA

Para una planificación del tratamiento y de la radioterapia externa son necesarios dos equipos. Para obtener las imágenes de la zona que se va a irradiar se usa un TAC que emplea energías del orden de kilovoltios; mientras que para la radioterapia es necesario alcanzar energías de megavoltios, por lo que se utiliza un LINAC.

2.1. TAC (Tomografía axial computerizada)

Técnica médica que consiste en la obtención de imágenes de cortes anatómicos mediante la atenuación de rayos X. Para ello, los haces de rayos X producidos en un tubo convencional a un voltaje típico de 120 kV, se dirigen al cuerpo del paciente en el que sufren atenuaciones por los efectos Compton y fotoeléctrico. Una matriz de sensores recoge los fotones que logran atravesar el cuerpo. Dependiendo de la densidad y composición del tejido atravesado, la atenuación final cambia, lo que provoca contraste en la imagen.

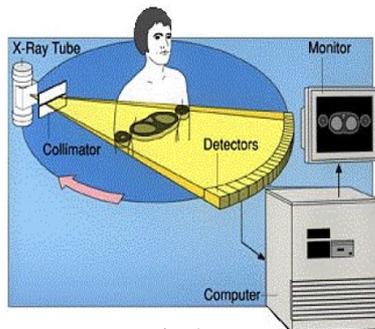


Fig. 3

Haciendo girar solidariamente el tubo de rayos X y la matriz de detectores alrededor del cuerpo (como se indica en la figura 3), se obtiene la imagen de un tomo a través de sus proyecciones. Por desplazamiento del conjunto tubo-detectores se obtiene los distintos tomos, que el ordenador utiliza para reconstruir una imagen 3D.

A cada voxel del cuerpo se le asigna un número *Hounsfield*, que está relacionado linealmente con la densidad del tejido que hay en dicho voxel. Los números *Hounsfield* de referencia son -1000 para densidad aire, 0 para agua y +1000 para hueso, y el resto de valores para densidades intermedias se obtienen linealmente a partir de ellos. Para la visualización, los programas asignan un valor de gris para cada número *Hounsfield*, de forma que la imagen se ve en escala de grises: negro para una densidad de aire (-1000) y blanco para densidad hueso (+1000).

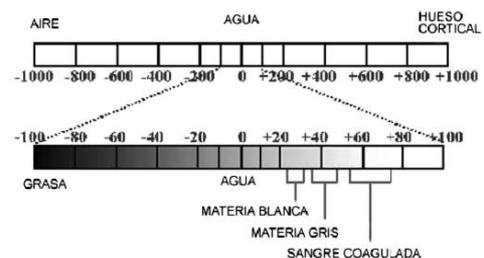


Fig. 4
Escala Hounsfield

2.2. LINAC de electrones

Dispositivo eléctrico de radioterapia que se encarga de la aceleración de partículas con carga eléctrica (electrones, protones, iones,...) hasta muy altas energías. Los electrones, que se desprenden de un filamento incandescente, son atraídos hacia un ánodo en forma de rejilla al que se le aplica cada milisegundo una alta tensión positiva que forma pulsos de electrones que se dirigen hacia la estructura aceleradora.

El objetivo de un acelerador lineal de radioterapia es alcanzar energías del orden de varios MeV, para lo que se usan campos eléctricos de radiofrecuencias. Un cierto

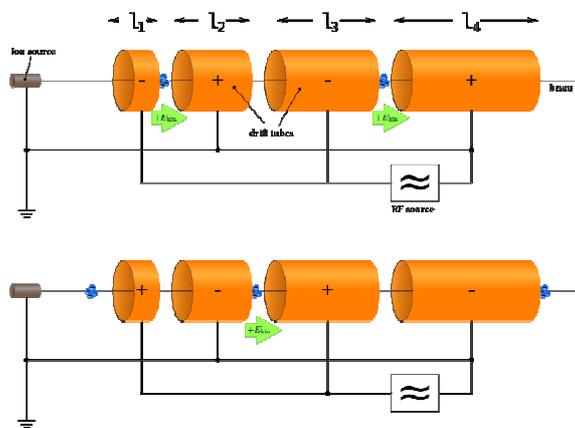


Fig. 5

número de tubos de longitud variable, se encuentran conectados entre sí de forma alternativa como se muestra en la figura 5. Su longitud aumenta según los pulsos de los electrones se aceleran para poder sincronizar la tensión alterna aplicada a los mismos. El haz de electrones acelerados al final del conjunto de tubos se desvía mediante campos magnéticos

para hacerles impactar contra un ánodo produciéndose rayos X de frenado con energías altas (en el caso del Hospital Campo Grande de 6 y 18 MeV de energía máxima).

Los aceleradores lineales de 18 MeV se usan para el tratamiento de órganos profundos, como los del interior de la pelvis, mientras que los de 6 MeV se utilizan para irradiar órganos más superficiales. La figura 6 muestra el denominado *Gantry* del LINAC, con la parte aceleradora, el ánodo y los colimadores.

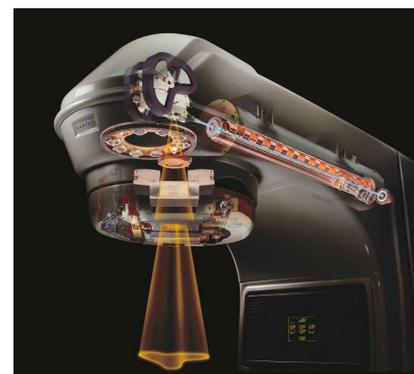


Fig. 6

Estos aceleradores también permiten irradiar con haces de electrones, para tratamientos superficiales hasta 4 cm de profundidad. Para ello no se hace chocar a los electrones contra el ánodo final, sino que se proyectan directamente fuera del *Gantry* o brazo del LINAC.

En la salida del *Gantry* se sitúan unos bloques y unas láminas de tungsteno móviles similares a los de la figura 7, un material muy radio-opaco, con las que se colima y define la forma del haz que queremos. La posibilidad de irradiar un tumor con haces de formas definidas es una de las claves de la radioterapia.



Fig. 7

Muchos de los aceleradores lineales actuales disponen de una matriz de sensores similar a la del TAC al pie del *Gantry* (estructura que se ve recogida en la figura 8), con el objetivo de poder comprobar mediante imagen que la posición del paciente es la correcta.

El conjunto *Gantry*-mesa (figura 8) dispone de seis grados de libertad de movimiento para poder alcanzar la mayor variedad de ángulos posibles de entrada de los haces en el cuerpo. De estos seis, cuatro corresponden a la mesa; tres movimientos en las tres direcciones cartesianas del espacio y un movimiento más de rotación respecto a un eje vertical situado cerca del *Gantry*. Los dos grados de libertad restantes están en



Fig. 8

el *Gantry*, uno de rotación respecto a un eje horizontal que permite un recorrido de 360° alrededor de la mesa del paciente, y por último una rotación de las láminas de tungsteno de la salida del haz, lo que le permite conferir varias formas. La intersección del eje de rotación de la mesa, el del *Gantry* y el de las láminas de tungsteno, definen un

punto en el espacio denominado isocentro, punto que recibe dosis en todo momento y que vamos a intentar situar en el interior de la masa tumoral.

-BLOQUE II-

TRATAMIENTO DEL

CÁNCER DE PRÓSTATA

3. ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DE LA PRÓSTATA

La próstata es una glándula exocrina del aparato genitourinario del varón que abraza al primer tramo de uretra tras salir de la vejiga y que se rige por hormonas como la testosterona. Situada en el hipogastrio, está formada por células que producen parte del líquido seminal que protege y nutre a los espermatozoides contenidos en el semen.

Se encuentra en el interior de la pelvis justo detrás de la sínfisis del pubis y tiene unas dimensiones medias de 4 cm de largo por 3 cm de ancho, aunque el tamaño de la próstata varía con la edad. Posee una envoltura llamada cápsula prostática que define sus límites. Su cara superior está en contacto con la vejiga y es atravesada de arriba a abajo por la uretra. Situadas en la parte postero-superior, se encuentran las vesículas seminales, unidas a la próstata por los conductos eyaculadores, que son la unión de conductos provenientes de las vesículas y los testículos (conductos deferentes). También, posterior a la próstata y colindante a ella, está el recto. Debido a su cercanía, los tactos rectales son la forma más habitual de examen de próstata.

La función principal de la próstata es la de producir el líquido prostático, que se vierte a la uretra a través de los conductos prostáticos. Ahí se mezcla con los espermatozoides y el líquido seminal (provenientes de testículos y vesículas seminales respectivamente) que llegan por los conductos eyaculadores y se forma el semen. El líquido prostático se encarga de aportar sustancias al semen que proporcionan un medio adecuado para la supervivencia de los espermatozoides.

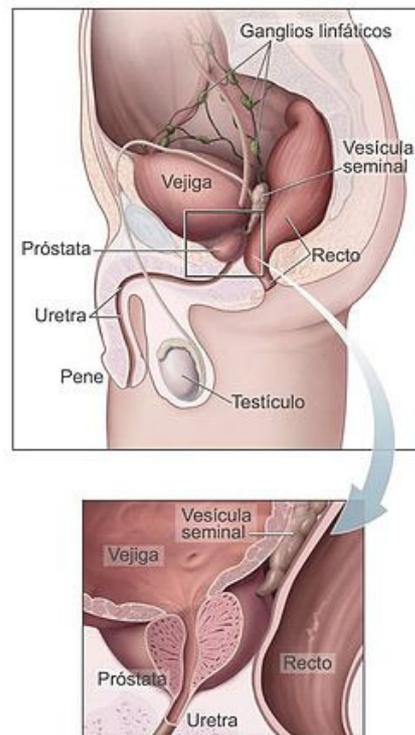


Fig. 9.
Situación de la próstata

Dentro de la próstata se pueden distinguir varias regiones importantes:

- Zona central, por la que circulan los conductos eyaculadores.
- Zona fibromuscular, situada en la cara anterior de la glándula.
- Zona de transición.
- Zona periférica, la cual ocupa la mayor parte del volumen de la próstata, y donde se suele localizar los tumores.
- Región de la glándula periuretral, que rodea a la uretra antes de la unión con los conductos eyaculadores.

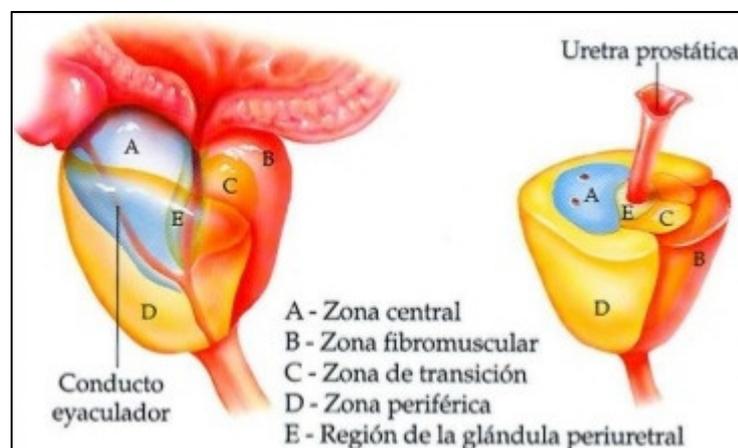


Fig. 10
Anatomía de la próstata

Las enfermedades más frecuentes que se producen en la próstata son las siguientes:

- ✓ Prostatitis o inflamación de la próstata. Pueden ser causadas por enfermedades de transmisión sexual, aunque las prostatitis crónicas se dan en varones de más de 50 años con hipertrofia prostática benigna.
- ✓ Hiperplasia benigna de próstata. Crecimiento excesivo del órgano con la edad hasta llegar a hipertrofiarse. Son cambios normales que sufre la próstata en los varones y causan síntomas de irritación de vejiga y problemas de micción.
- ✓ Cáncer de próstata. Muy prevalente en los hombres, aunque es un caso especial de tumor, ya que el 70% de los casos permanecen asintomáticos y no se necesita tratamiento. La mejor manera de diagnosticar un tumor prostático es mediante biopsia. Tras la detección del cáncer, en caso de que sea agresivo se procede a tratarlo por la técnica adecuada.

4. FASES DEL TRATAMIENTO

El equipo de oncología del hospital es el que decide cual es la terapia idónea para cada paciente, decisión que depende de muchos factores como la edad, la proximidad a órganos vitales, las dimensiones del tumor, si ha metastatizado, estadio de la enfermedad, etc...

En nuestro caso, el paciente ha sido diagnosticado de un tumor en la próstata y vesículas seminales sin que existan metástasis. Se ha decidido que se debe realizar un tratamiento de radioterapia externa con el LINAC.

En los TAC de radiodiagnóstico se observa una hipertrofia de próstata y hay que irradiar todo el órgano así como las vesículas seminales, teniendo especial cuidado con el recto y la vejiga.

4.1. SIMULACIÓN

Una vez que el paciente está en el servicio de radioterapia, lo primero que se hace es una simulación para generar un modelado en 3D del cuerpo tumoral y los alrededores para poder trabajar vía software. Con dicho objetivo, se somete al paciente a un TAC de planificación en la posición en la que se le aplicará posteriormente el tratamiento. De esta forma conseguimos cortes virtuales de la posición exacta en la que se va a trabajar e irradiar durante todo el tratamiento.

4.1.1. Características de un TAC de planificación

- Dado que el paciente debe de estar en la posición más adecuada para el tratamiento, el hueco central del TAC de simulación es de mayor diámetro que el de los TAC convencionales. Esto se debe a que la posición en ocasiones requiere mantener los brazos en un determinado ángulo para que los haces del tratamiento puedan incidir lo más directamente posible sobre el cuerpo sin irradiar innecesariamente los brazos.

- Mientras que en los TAC convencionales la mesa sobre la que se recuesta el paciente tiene forma cóncava, en estos casos la mesa es completamente plana con el objetivo de imitar la mesa sobre la que se va a realizar el tratamiento. En la planificación se ignorará, ya que es de distinto material que la mesa de la radioterapia, compuesta de plástico y fibra de carbono, materiales muy radio-transparentes, ideales para radioterapia, ya que no atenúan prácticamente los haces.

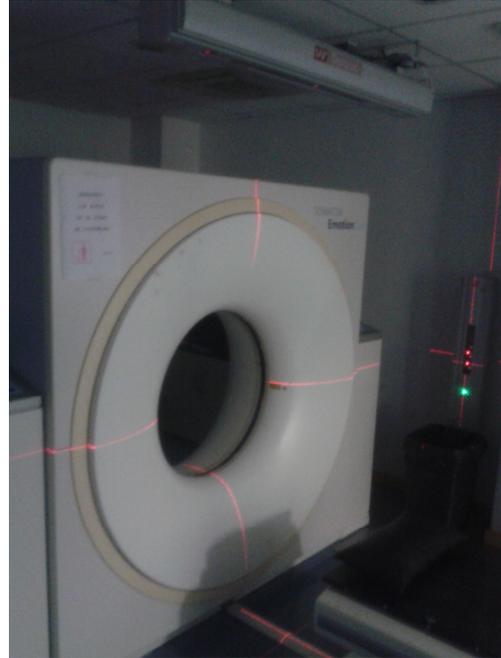


Fig. 11

- Como se observa en la figura 11, es muy importante fijar bien las referencias de la posición necesaria, por lo que para la realización del TAC, la sala cuenta con 3 láseres (uno en cada pared lateral y otro en el techo) que determinan los planos coronal, sagital y axial principales. Estos planos van a definir tres puntos en el cuerpo del paciente que se marcan colocando perdigones metálicos radio-opacos para que se puedan ver en las imágenes y poder definir un plano cero del paciente. Tras el TAC, se retiran esos perdigones y se marca la posición tatuando un punto sobre la piel. La sala del LINAC, donde se va a irradiar al paciente, tiene ese mismo juego de láseres en las mismas posiciones, así que simplemente hay que colocar al paciente para que coincidan las marcas con los cortes de los haces de luz para asegurarnos de que la posición es la misma en todo momento.

4.1.2. Sistemas de inmovilización

Para zonas complicadas o que requieran una precisión extrema, existen moldes y sistemas de inmovilización para fijar milimétricamente la posición del paciente que le deberán acompañar durante todas las sesiones de radioterapia. Muchos de estos sistemas se anclan a determinados puntos de la mesa para conseguir una fijación absoluta y son lo más radio-transparentes posibles para evitar que interfieran en las dosis. Dependiendo de la zona de irradiación, se pueden usar multitud de técnicas, entre las que destacan:

- ✓ CUNA ALFA: Sistema utilizado para la inmovilización de cualquier región anatómica que consiste en una bolsa de plástico en la que se mezclan dos componentes poliméricos. Éstos generan una reacción de polimerización exógena, por la cual se crea una espuma que va creciendo y finalmente se solidifica tomando la forma de la posición del paciente que está sobre la bolsa. Se adapta muy bien al cuerpo, pero el mayor inconveniente con el que nos encontramos es que es un sistema no reutilizable, la cuna alfa acompaña al paciente durante todo el tratamiento y después se desecha. En la fotografía se ve una cuna alfa, ya en estado sólido, correspondiente a un brazo.



Fig. 12

- ✓ COLCHONES DE VACÍO: Parecido a las cunas alfa, este método consta de una bolsa que contiene bolitas de poliestireno en su interior. Al colocarse el paciente encima, se realiza el vacío en la bolsa y toma la forma anatómica del paciente. Tiene la clara ventaja sobre las cunas alfa de que este método es reutilizable, pero se va desinflando poco a poco a lo largo del tratamiento.



Fig. 13

- ✓ MÁSCARAS TERMOPLÁSTICAS: Utilizadas para la inmovilización de la cabeza, estas máscaras están hechas de un material termoplástico que se calienta en agua a 75°C, se deja secar y se aplica sobre la cara del paciente, donde se vuelve rígida a los 4 minutos. Se unen a una base reposacabezas y se anclan a la mesa. Las marcas de posicionamiento se pueden realizar sobre la máscara directamente.



Fig. 14

- ✓ PLANOS INCLINADOS: Se trata de cuñas con apoyos para mantener en determinados ángulos las extremidades. Los apoyos se pueden cambiar de posición y de orientación, una vez que se alcanza la posición ideal, se fijan. Se usan espacialmente en casos de tumores de mama o de pulmón.



Fig. 15

- ✓ ESPUMAS RÍGIDAS: Materiales plásticos que ofrecen sujeción de extremidades.

En el caso del tumor de próstata y vesículas seminales que vamos a tratar, no es necesario ningún método de sujeción, aunque es muy común el uso de cuñas alfa para este tipo de patología.

Dado que la próstata es un órgano con una posición muy variable dentro de la cavidad pélvica, el paciente tiene que acudir a todas las sesiones (de simulación y tratamiento) en las mismas condiciones: la vejiga llena y el recto vacío. De esta forma la posición de la próstata siempre es similar y las dosis recibidas por la vejiga y el recto se minimizan.

4.2. PLANIFICACIÓN DEL TRATAMIENTO

Esta es la parte en la que el personal radiofísico del hospital es clave. Se basa en la dosimetría clínica, técnica que estudia la distribución de la dosis en los tejidos. En esta etapa se decide la estrategia a seguir en las irradiaciones. Para ello, el Hospital Campo Grande de Valladolid cuenta con la ayuda del programa *Pinnacle 3* de Philips, con el que se realizan cálculos de dosis, ángulos idóneos de los haces de rayos, reconstrucciones 3D de la zona de la masa tumoral, etc...

En este apartado vamos a seguir un tratamiento de radioterapia de próstata a través de este programa, comentando la utilidad de cada paso:

4.2.1. Definición de volúmenes

Tras la simulación, el médico oncólogo y el radiofísico disponen de las imágenes virtuales generadas por el TAC. Sobre cada uno de los cortes obtenidos, el médico se encarga de dibujar varias zonas basándose en la diferencia de densidades entre tejido sano y tejido tumoral, expresadas en la pantalla por diferencia de números *Hounsfield* y, en última instancia, escala de grises.

➤ **GTV (*GROSS TUMOR VOLUME*)**

Señala el tumor macroscópico visible en su totalidad. En caso de que el tumor ocupe una única porción del órgano, solo se marca esa porción.

➤ **CTV (*CLINICAL TARGET VOLUME*)**

Incluye en su interior el propio GTV y otras zonas alrededor de éste en las que posiblemente haya más células tumorales microscópicas susceptibles de tratamiento.

➤ **PTV (*PLANNING TARGET VOLUME*)**

Esta es la zona a tratar, la que va a recibir la dosis prescrita por el médico. Contiene el CTV y unos márgenes de seguridad a su alrededor

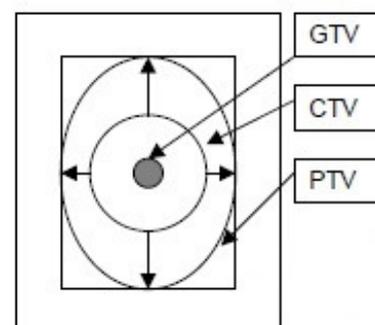


Fig 16
Volúmenes importantes

definidos para asegurarse que la zona tumoral es irradiada por completo a pesar de los ligeros movimientos del paciente o del propio órgano.

➤ **ÓRGANOS COLINDANTES IMPORTANTES**

También se señalan los órganos de riesgo que hay en la zona, ya que los tejidos no dañados no pueden sobrepasar unos límites de radiación, por lo que hay que conocer la situación exacta y la dosis que recibe cada órgano de éstos. En nuestro caso, los órganos más importantes que hay que señalar para no sobrepasar una cierta dosis son el recto y la vejiga.

En el caso que consideramos aquí, existen dos núcleos tumorales, por lo que se dibujan dos volúmenes GTV: en color rojo podemos ver la próstata y en color verde claro observamos las vesículas seminales. Al ser dos órganos completamente diferentes, requieren distintas dosis de radiación para el tratamiento (la próstata necesita mayor dosis), por lo que hay que idear dos fases, la primera para tratar un volumen PTV que englobe los dos órganos (verde oscuro) y la segunda que solo contempla el volumen PTV morado, la próstata. Como órganos de riesgo, el médico ha pintado de rosa la cabeza femoral derecha, de azul claro la cabeza femoral izquierda, de marrón el recto y de amarillo la vejiga (que no aparece en este corte mostrado en la figura 17).

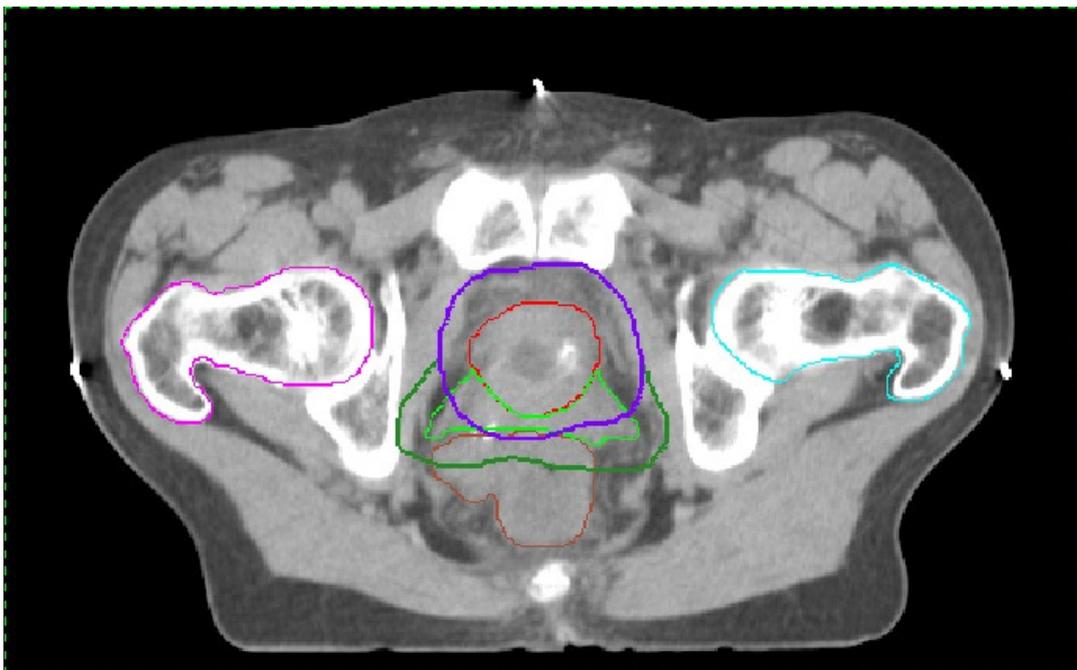


Fig. 17

4.2.2. Configuración de parámetros de irradiación

Una vez dibujadas estas zonas en cada corte, el programa se encarga de juntar las informaciones bidimensionales dibujadas en cada plano y crear unos volúmenes 3D para cada zona señalada.

El radiofísico recibe los volúmenes y los cortes anteriormente indicados, así como la cantidad de dosis prescrita por el médico y la dosis por sesión que requiere el tratamiento. En nuestro caso, la dosis diaria para los PTV es de 2 Gy/sesión, y el total para cada órgano es de 76 Gy para la próstata y 56 Gy para las vesículas seminales, por lo que el PTV verde oscuro deberá recibir 56 Gy (28 sesiones) y posteriormente el PTV morado tiene que recibir 20 Gy adicionales (10 sesiones), alcanzando así el total requerido. Una vez recibida toda esta información, el radiofísico con la ayuda del programa, diseña el tratamiento más adecuado para que se cumplan las condiciones y las dosis que el paciente necesita. En el diseño en sí, se siguen los siguientes pasos:

- 1) Se define dónde está la mesa camilla del tratamiento, ya que el programa tiene que ignorarla y no tener en cuenta su densidad, que no es la misma que la de la mesa de radioterapia. Las imágenes con las que trabaja el ordenador son representaciones de densidades de puntos del cuerpo.

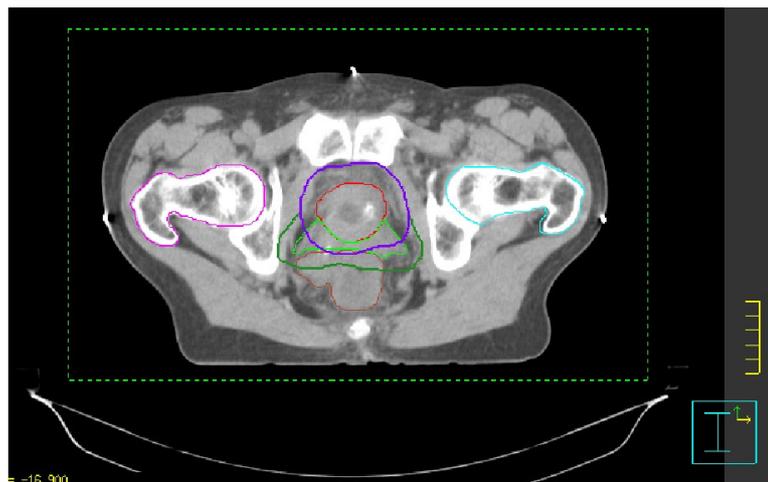


Fig. 18

- 2) Se define el eje de coordenadas con el que se va a trabajar durante el tratamiento. Para ello se buscan los perdigones metálicos en la piel del paciente que indican los puntos definidos por los láseres en la simulación. Así, aparecen en las imágenes en

el ordenador y podemos establecer el corte cero del paciente. Todos los planos se definirán a partir de éste (figura 18).

- 3) Se sitúa el isocentro del LINAC dentro del paciente, que es donde se juntan los tres ejes de rotación de la máquina. Lo conveniente es situarlo en el centro del tumor para facilitar las irradiaciones. Durante el tratamiento, el paciente tiene que colocarse de forma que los isocentros (el definido en el programa y el real de la máquina) coincidan, ya que las coordenadas que sigue el LINAC se miden respecto a este punto. Para ello se debe facilitar al técnico las coordenadas del desplazamiento de la camilla necesarias.
- 4) Una vez definidas todas las coordenadas dentro del paciente, hay que configurar los haces de irradiación para cada fase. Lo primero de todo es ver cuantos haces pueden ser necesarios según la accesibilidad de la zona tumoral, las estructuras adyacentes, la dosis requerida, etc... En nuestro caso, se usan cinco haces en cada fase, para los que hay que configurar una serie de cuatro parámetros. Comenzando por los haces de la Fase 1, dichos parámetros son:

- a. Qué máquina de las dos disponibles usa cada haz (6 ó 18 MeV). Cuanta más energía tenga, mayor penetración de tejidos. Si queremos tratar tumores profundos, es conveniente usar la de 18 MeV.
- b. Modalidad de la radiación. Se puede elegir entre fotones (tratamientos profundos) o electrones (tratamientos superficiales).

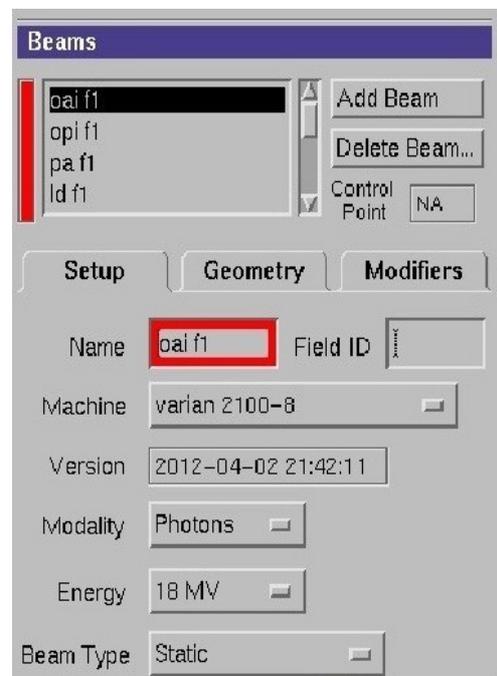


Fig. 19
Máquina, energía y modalidad de un haz

- c. Orientación del haz, ángulo con el que el haz penetra en el cuerpo, irradiando lo menos posible las estructuras sanas.

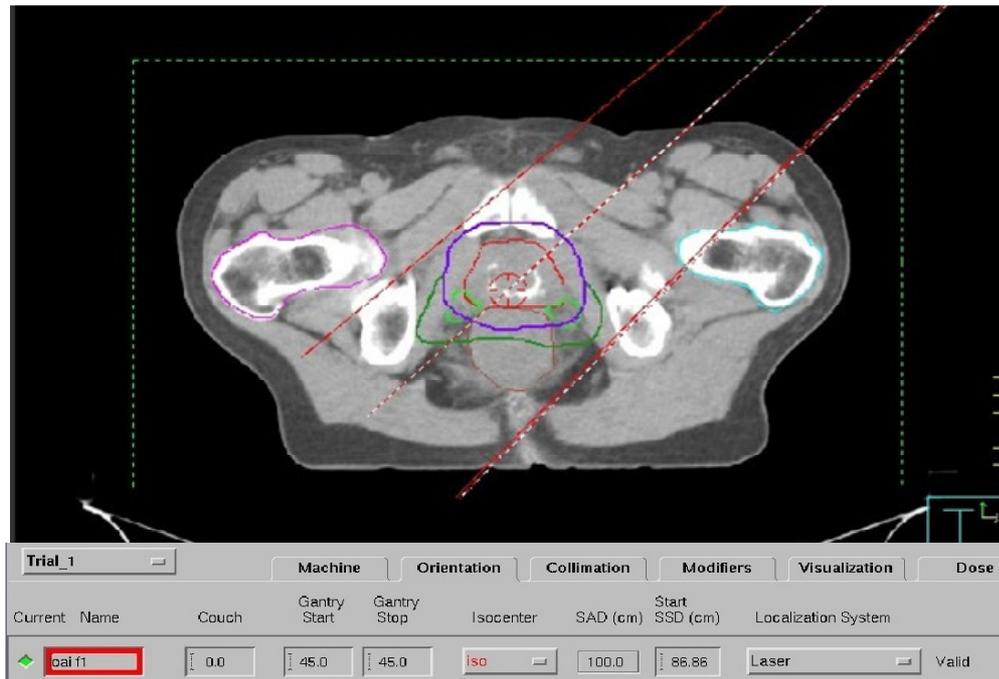


Fig. 20
Orientación del haz

- d. Forma del haz. Como hemos visto en el apartado del LINAC, en la salida de los haces hay un conjunto de bloques y láminas de tungsteno que se deslizan unas respecto a otras para conferir la forma del haz de salida. Observando el PTV (el verde en este caso) y el resto de volúmenes importantes, desde el punto de vista de la salida del *Gantry* en el ángulo que hemos puesto, el programa modifica automáticamente las posiciones de las láminas para que se ajusten, de la manera más precisa posible, a la proyección del PTV bajo ese ángulo. Así conseguimos no irradiar estructuras adyacentes en exceso. El *Gantry* con el que trabajamos dispone de 120 láminas de tungsteno, 80 son de 5 mm de grosor y 40 de 10 mm, que corresponden con las líneas blancas en el esquema de la figura 21.

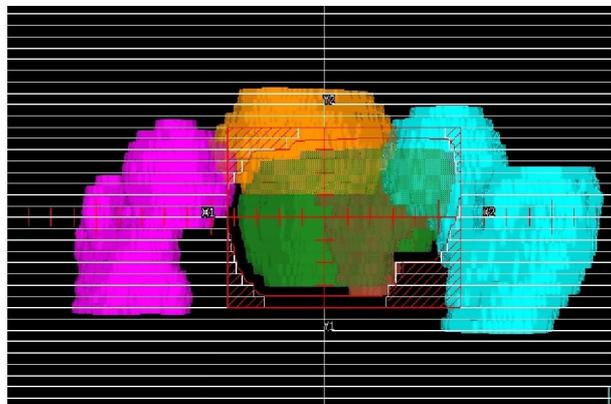


Fig. 21
Volúmenes desde el punto de
vista del haz

Al acabar de configurar uno de los haces, se pasa al siguiente y se repite toda la operación, y así con todos los que se hayan seleccionado, de forma que todos los haces confluyan y su intersección se adapte lo mejor posible a la zona marcada como PTV, la zona a irradiar. Tras configurar los cinco haces de la fase 1 con el PTV objetivo próstata-vesícula, se configuran otros cinco para tratar el PTV objetivo de la próstata sola.

En la figura 22 se muestra una captura de pantalla del programa de planificación *Pinnacle 3*, donde se pueden observar las características y una representación de los cinco haces correspondientes a la fase 1. En la parte de la izquierda se observa la máquina (*Varian 2100-8*), la energía (18 MV) y la modalidad (photons) de uno de los haces (rojo). En la parte de abajo se observa la geometría de cada haz, es decir, con que ángulo penetra en el cuerpo (45, 100, 180, 270 y 315). Las posiciones de arranque y parada del *Gantry* son las mismas para cada haz porque éste no se mueve durante el disparo. En caso de moverse mientras irradia (terapia por arcos), esas posiciones serían diferentes entre sí.

Current	Name	Couch	Gantry Start	Gantry Stop	Isocenter	SAD (cm)	Start SSD (cm)	Localization System	
◆	bai f1	0.0	45.0	45.0	iso	100.0	86.86	Laser	Valid
◇	opi f1	0.0	100.0	100.0	iso	100.0	84.68	Laser	Valid
◇	pa f1	0.0	180.0	180.0	iso	100.0	89.87	Laser	Valid
◇	ld f1	0.0	270.0	270.0	iso	100.0	83.54	Laser	Valid
◇	pad f1	0.0	315.0	315.0	iso	100.0	87.53	Laser	Valid

Fig. 22

4.2.3. Cálculo de la distribución de dosis

Teniendo los cinco haces de rayos configurados en ángulo de entrada y apertura, se deja al programa planificador que calcule la dosis que se recibe en cada diferencial de volumen de la zona irradiada y dibuja algunas líneas de isodosis clave. La mayoría de programas nuevos usan el método Montecarlo (probabilístico) para estos cálculos.

El programa divide el total de la dosis que se debe administrar (56 Gy en la fase 1 y 76 Gy tras las dos fases) entre los haces que hemos incluido en el diseño del tratamiento, de forma que la intersección de todos ellos reciba el 100% de la dosis prescrita. Realmente el programa parte de un porcentaje mayor, ya que hasta llegar al tumor en el interior del cuerpo la intensidad de los haces se va amortiguando. Es trabajo del radiofísico ir variando los porcentajes que corresponden a cada haz para que la zona PTV se lleve la máxima dosis posible y los alrededores, la mínima.

Para que un tratamiento esté bien hecho, se tienen que cumplir una serie de condiciones imprescindibles:

- ✓ Ningún punto del cuerpo debe superar el 107% de la dosis prescrita por el médico, en nuestro caso 59,92 Gy en la fase 1 y 81,32 Gy tras las dos fases. Estas zonas se llaman zonas calientes, y están terminantemente prohibidas.
- ✓ Como mínimo, el 95% del volumen PTV debe recibir el 95% de la dosis prescrita (en nuestro caso 53,2 Gy / 72,2 Gy), aunque lo ideal es que reciba el 100%.

✓ Existen tablas de dosis límite de órganos sanos, por lo que hay que tener especial cuidado con los órganos vitales adyacentes a la zona de irradiación; en

Adult reference dose/volume limits			
Structure	Volume (cc)	Total Dose (Gy)	Max Dose (Gy)
Bladder	15%	80	
Bladder	25%	75	
Bladder	35%	70	
Bladder	50%	65	
Femoral heads	25%	45	50
Femoral heads	40%	40	50
Rectum	15%	75	
Rectum	25%	70	
Rectum	35%	65	
Rectum	50%	60	

Fig. 23

nuestro caso, el recto, las cabezas femorales y la vejiga, y asegurarse de que no reciben el máximo permitido mostrado en la figura 23.

Tras la fase 1, las superficies isodosis quedan como en la figura 24. Las superficies de colores señalan la dosis mínima que recibe la zona a causa de los cinco haces programados para esta fase. En la superficie rosa se recibe 56 Gy o más, y en la superficie azul celeste 53,2 Gy o más.

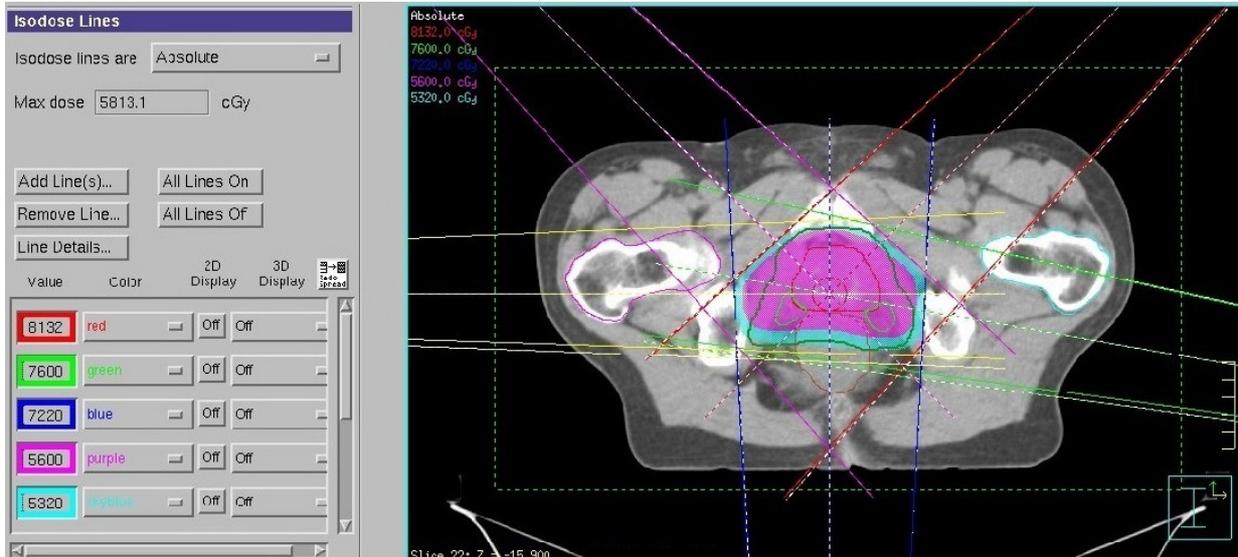


Fig. 24

Tras la fase 2, añadiendo los otros cinco haces, las isodosis quedan de la forma mostrada en la figura 25, apareciendo unas superficies nuevas de 76 Gy (verde) y 72,2 Gy (azul oscuro).

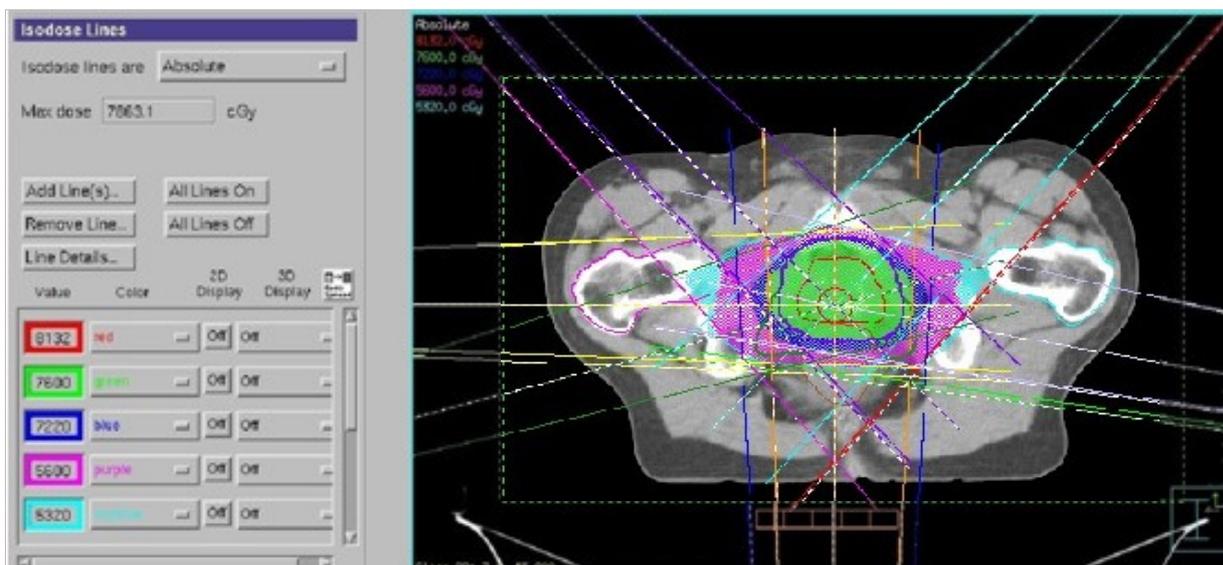


Fig. 25

Para comprobar de forma rigurosa que se cumplen las tres condiciones, existe la opción de mostrar el histograma de volumen-dosis de todos los elementos seleccionados tras la fase 2 (figura 26):

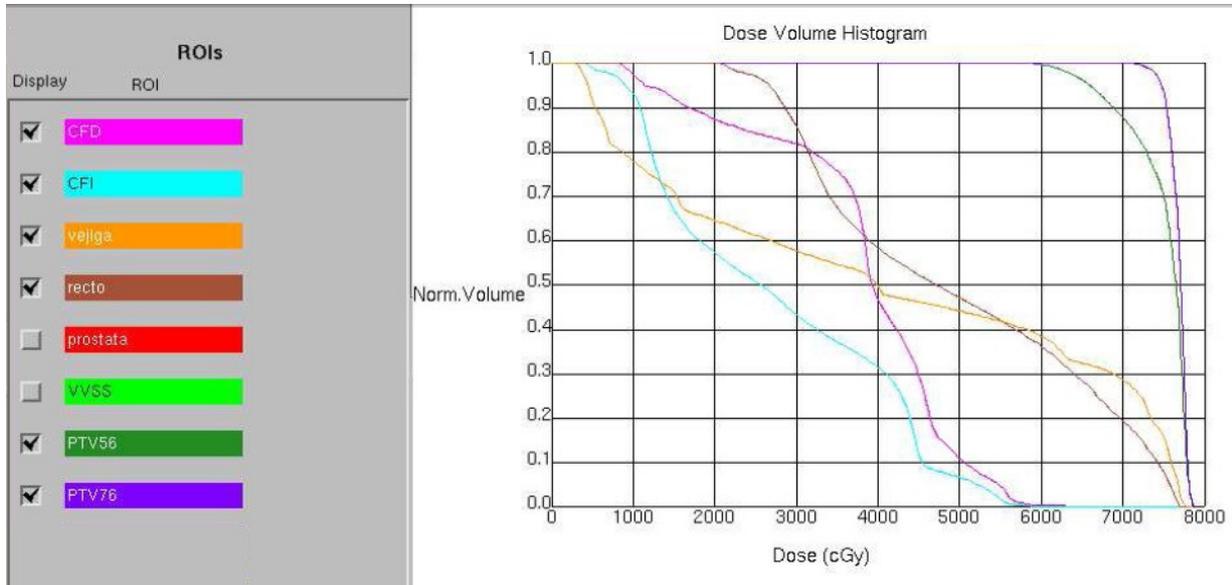


Fig. 26

En él se puede ver que ningún punto supera el 107% de la dosis (81,32 Gy), que en las estructuras adyacentes no se supera las dosis máximas, y que el 95% del PTV de la fase 2 (línea morada) recibe al menos el 95% de la dosis prescrita (72,2 Gy).

En caso de que alguna de las condiciones no se cumpla, el radiofísico debe reconsiderar los porcentajes asignados a cada haz, o incluso los ángulos de entrada al cuerpo. En ocasiones no se puede alcanzar un resultado final completamente satisfactorio, en cuyo caso se debe valorar los riesgos de sobre-irradiar zonas sanas, con el fin de tratar el PTV completo. Una vez logradas las condiciones, el médico tiene que dar el visto bueno al tratamiento. Entonces, se procede a irradiar.

Una vez acabada la planificación, se realiza un informe donde se detallan todas las características del paciente, la posición que debe tener en la camilla, la dosis total que debe recibir, el número de sesiones, cada una de las características de los haces que se han programado, etc...

4.3. SESIONES DE TRATAMIENTO

Una vez realizada la simulación y los cálculos para el tratamiento del tumor, se cita al paciente para comenzar la terapia. Las instalaciones del Hospital Campo Grande de Valladolid cuentan con dos salas de radioterapia convenientemente aisladas con una máquina en cada una de ellas. Una de ellas es monoenergética, con haces de fotones de 6 MeV de energía máxima; mientras que el otro *Gantry* es más completo, ya que permite de lanzar haces de fotones de 6 y 18 MeV (tratamientos profundos como el de próstata) y haces de electrones de 4, 6, 9, 12 y 16 MeV (tratamientos superficiales hasta 4 cm). Ambos aparatos disponen de unas tuberías de agua en movimiento que refrigeran los motores y los mantienen a la temperatura adecuada. La mesa que se usa es de plástico y fibra de carbono, lo más radio-transparente posible para evitar atenuaciones.

En la fase 1, se irradiará el conjunto próstata – vesículas seminales hasta 56 Gy con el primer juego de haces diseñado. Se procederá con esa fase durante 28 sesiones. En la fase 2, se cambia el juego de haces y se irradia durante otras 10 sesiones solamente la próstata, consiguiendo 20 Gy en la misma y alcanzando los 76 totales requeridos. Por lo tanto, el paciente deberá acudir un total de 38 sesiones, unas 7 semanas.

En la primera sesión, llamada “inicio del tratamiento”, se sitúa al paciente en la misma posición que cuando se hizo el TAC de la simulación (si es necesario un molde del cuerpo, se pondrá), ya que con esa posición es con la que hemos estado planificando el tratamiento. El técnico especialista es quien se asegura, con la ayuda de los juegos de láseres similares a los de la sala de simulación (figura 27), de que el paciente esté en la



Fig. 27

posición correcta y que el isocentro definido en el paciente concuerde con el isocentro de la máquina (colocando las marcas de los haces donde corresponde y moviendo la mesa hasta hacer coincidir los isocentros). El técnico se encarga, el primer día, de asegurar que la posición

es la idónea realizando una radiografía con el propio acelerador lineal (con la matriz de sensores que se ve en la figura 27) y comparándola con la hecha en el TAC de la simulación. Si ambas coinciden, la posición se da por buena y comienza la irradiación planificada.

Al proceder los cinco haces de la misma máquina, el *Gantry* de ésta tendrá que rotar alrededor del paciente hasta alcanzar los ángulos previstos y automáticamente irá moviendo las láminas de tungsteno de la salida de los haces para adecuarse a las formas ideadas para cada ángulo. Tanto la posición del *Gantry* como la de las láminas de tungsteno se han definido durante la planificación y el tiempo de irradiación en cada posición se calcula automáticamente con el programa. La mesa de tratamiento no se mueve durante toda la irradiación, ya que la planificación se ha hecho con el cuerpo en una posición fija.

Las sesiones tienen una duración media de entre 10 y 20 minutos, dependiendo de la complejidad, empleando la mayor parte del tiempo en la colocación idónea del paciente. El tiempo de irradiación total es de un par de minutos a lo sumo.

4.4. IMRT, ARCOS Y PLANIFICACIÓN INVERSA

Existen otras modalidades de planificación de radioterapia:

- ✓ En el método de haces únicos que hemos visto, la configuración de las láminas de tungsteno no varía para un mismo ángulo y la intensidad es uniforme en esa dirección. Sin embargo, en el método de IMRT (Radioterapia de Intensidad Modulada) por cada posición del *Gantry*, la disposición de las láminas va cambiando con el objetivo de conseguir una distribución de intensidad no uniforme para dicha posición. De esta forma se puede amoldar mejor la intensidad del haz a la geometría de la zona afectada y evitar daños a los órganos colindantes.

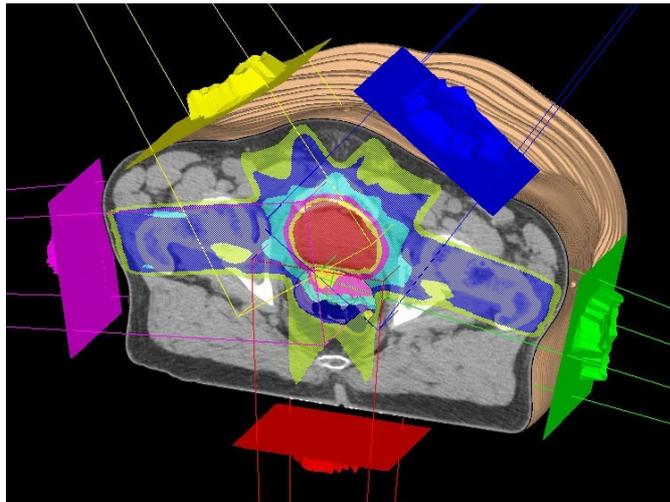


Fig. 28
Haces obtenidos con IMRT

- ✓ En la terapia por arcos, el *Gantry* no irradia hacia el cuerpo desde posiciones fijas, sino que realiza movimientos de rotación alrededor del paciente irradiando de forma continua. Si es necesario, la configuración de las láminas de tungsteno también puede ir variando durante la trayectoria.
- ✓ Otro tipo de método es el llamado de planificación inversa. En él, en lugar de calcular las superficies isodosis posteriormente a la configuración de los haces, se calculan las distribuciones de intensidad de cada haz a partir de la distribución de volumen a irradiar en cada ángulo, como se observa en la figura 29.

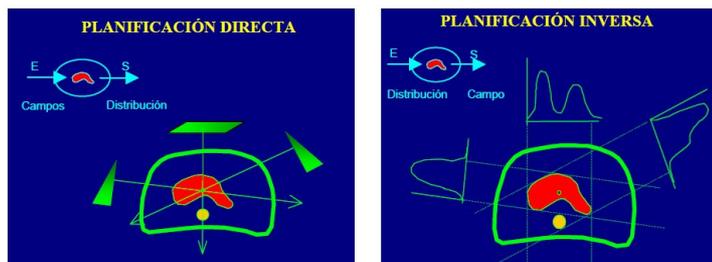


Fig. 29

4.5. EFFECTOS SECUNDARIOS

A modo de información adicional, a continuación se exponen los posibles efectos secundarios que pueden aparecer como consecuencia de la radioterapia:

Aunque la radioterapia en sí es indolora, durante las sesiones los pacientes experimentan un calentamiento de la zona y con frecuencia, enrojecimiento y sequedad en la piel en la zona de penetración del haz. Salvo que se irradie la cabeza, la radioterapia no produce la caída de cabello como la quimioterapia.

Se pueden producir cambios en el estado general del paciente como cansancio, fatiga, decaimiento o apatía así como náuseas. Además, se crea un periodo de inmunodeficiencia celular importante, por lo que se está más expuesto a infecciones y la recuperación puede ser más lenta.

En irradiaciones de las gónadas (testículos y ovarios), es probable que dejen de producirse gametos, debido a que son muy sensibles a la radiación. Estas zonas se tratan de evitar en las planificaciones de los tratamientos, pero si no se pueden excluir completamente, es aconsejable radiar tan solo una de las gónadas, para evitar infertilidad completa en el paciente.

La radiación es una causa potencial de aparición de otros tipos de cáncer, pero con las dosis habituales de radioterapia, solo se detecta este efecto secundario tras 20 ó 30 años después del tratamiento en 1 de cada 1000 pacientes.

La irradiación de mujeres embarazadas es muy dañina para el feto, que se encuentra en pleno periodo de formación, por lo que la radioterapia está contraindicada en caso de embarazo.

4.6. OTRAS OPCIONES DE TRATAMIENTO

Decidir que tratamiento es el adecuado para el cáncer de próstata es una tarea bastante complicada y debe ser individualizada para cada paciente, ya que se deben considerar muchos factores como la edad, expectativa de vida, posibles efectos secundarios, estado y grado del tumor, etc...

Existen varias opciones para el tratamiento del cáncer de próstata que se describen brevemente a continuación como complemento del trabajo (ya que de todas ellas el radiofísico solamente participa en la braquiterapia):

➤ **CIRUGÍA**

La prostatectomía es una operación quirúrgica en la cual se extirpa la próstata que normalmente se realiza a través de cirugía laparoscópica suprapúbica. Se suele efectuar en varones menores de 70 años, ya que en edades más avanzadas los beneficios no superan los riesgos que supone la intervención.

➤ **CRIOCIRUGÍA**

Se emplea en el tratamiento de zonas tumorales localizadas dentro de la próstata, destruyendo por congelación las células malignas y retirándolas.

➤ **FOTOVAPORIZACIÓN DE LA PRÓSTATA CON LÁSER**

Este proceso consiste en vaporizar la próstata mediante un haz de luz láser dirigido por medio de una fibra óptica hacia el tejido prostático a través de la uretra. Es un procedimiento relativamente nuevo con el que se evitan las complicaciones de la cirugía convencional. El tejido de la próstata desaparece y se coagulan los vasos sanguíneos.

➤ **BLOQUEO HORMONAL ANDROGÉNICO**

Consiste en reducir la producción de hormonas masculinas (testosterona) a nivel de los testículos, ya que éstas se encuentran relacionadas con el crecimiento prostático. De esta manera, se logra una reducción de la masa y velocidad de crecimiento tumoral.

➤ QUIMIOTERAPIA

En los casos en los que el tumor se ha extendido más allá de la zona de la próstata (metástasis), se recurre a este tratamiento, que consiste en la administración de fármacos que actúan contra las células cancerosas que se dividen muy rápidamente en todo el cuerpo. El principal problema es que este tratamiento también ataca a zonas sanas pero de rápido crecimiento celular, como son las células sanguíneas, partes del aparato digestivo o el cabello. En muchas ocasiones, el objetivo de este tratamiento no suele ser eliminar todas las células cancerosas, sino disminuir el crecimiento del cáncer y reducir el dolor (tratamiento paliativo).

➤ BRAQUITERAPIA

Este tratamiento se basa en la introducción de pequeñas semillas radiactivas, del tamaño de un grano de arroz, en el interior de la próstata del paciente. La radiación producida por estas semillas suele ser de muy poco alcance, partículas beta o gamma de poca energía. De este modo, la dosis se deposita únicamente en el órgano tumoral, en este caso, la próstata. Las estructuras sanas colindantes no quedan expuestas a radiación.



Fig. 30
Semillas de I-125

Existen dos tipos de braquiterapia, pudiéndose combinar ambas con sesiones de radioterapia:

a) Permanente de baja tasa de dosis

Se colocan en el interior de la próstata entre 40 y 100 semillas de yodo-125 con la ayuda de una aguja muy fina, repartidas homogéneamente, que permanecen dentro del paciente de forma indefinida. El ^{125}I es un emisor gamma de 27 keV cuya vida media es de 59 días, por lo que esas semillas irán irradiando la próstata desde el interior, como se observa en la figura 31, de forma continuada durante unos 6 meses, cuando se ha extinguido casi completamente la actividad, aportando una dosis final de aproximadamente 144 Gy.



Fig. 31

b) Braquiterapia de alta tasa de dosis

Esta técnica, realizada en ámbito quirúrgico, consiste en la inserción de uno o varios catéteres huecos en el interior del órgano a tratar, por los cuales se introduce (y se retira) una semilla de Iridio-192 en una cápsula de platino.



Fig. 32

La fuente radiactiva, de gran actividad, se encuentra en un contenedor bien protegido (figura 32). Solo sale al exterior durante la sesión de braquiterapia, momento en el que se une el catéter hueco que se va a utilizar, con alguno de los agujeros salientes de los que dispone el contenedor. Una vez unidos, por los agujeros sale un alambre metálico en cuyo extremo se encuentra la fuente e, impulsados por un motor, se detienen en distintas posiciones dentro del catéter

huevo, para finalmente volverse a guardar en el contenedor hasta la siguiente sesión.

Durante la planificación del tratamiento, el radiofísico calcula cuales son las posiciones óptimas de la fuente de ^{192}Ir dentro del órgano afectado y el tiempo que debe permanecer en cada una de ellas para que el tumor reciba la mayor dosis posible y los órganos adyacentes no se vean afectados. Con un simulador virtual, se puede ver la dosis que recibe cada punto del volumen como ya hemos visto en la radioterapia externa. En tumores prostáticos, se definen siete posiciones en intervalos de 5 mm, cubriendo así una longitud de unos 3 cm, y en cada posición se mantiene la fuente un minuto. Los tratamientos suelen ser de entre cuatro y seis sesiones.

El tiempo que debe estar la semilla en cada punto depende de la actividad que tenga en ese momento la fuente, por lo que en quirófano y durante la planificación debe haber una tabla con la actividad diaria del ^{192}Ir para poder modificar los tiempos. La fuente se cambia cada cuatro meses, asegurándose así una actividad suficientemente alta para los tratamientos.

En la parte de la izquierda de la figura 33 se ve una simulación del catéter hueco con el alambre y la fuente en su interior. A la derecha se pueden observar los tiempos designados a cada posición de la fuente dentro del catéter.

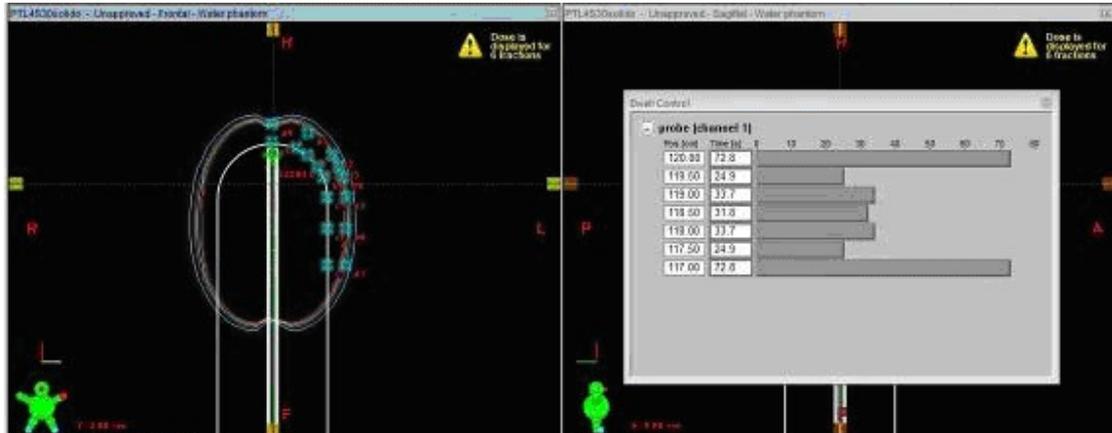


Fig. 33

-BLOQUE III-
PRECAUCIONES Y
CONTROLES DE
CALIDAD

5. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Una de las principales tareas en un centro de radioterapia es cerciorarse la correcta seguridad. Los trabajadores no deben recibir más dosis de la máxima recomendable, y los pacientes no pueden estar expuestos a más radiación de la prescrita. Para ello hay que asegurarse que equipos, instalaciones y personal cumplen las condiciones adecuadas de seguridad.

Los equipos que se usan en las instalaciones, TAC, LINAC y equipos de braquiterapia, deben estar debidamente protegidos mediante un revestimiento de materiales metálicos con alta capacidad de absorción de partículas ionizantes para evitar fugas de radiación peligrosas. En el caso de que las semillas de braquiterapia se salgan de su habitual contenedor, se deben meter rápidamente en un pequeño contenedor auxiliar revestido de plomo y avisar al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) para su retirada.

Las paredes de las salas en las que hay fuentes de radiación están hechas de hormigón con rastros de plomo. Las salas de los LINACs se construyen con paredes laberínticas (figura 34) para que incidan pocos fotones en la puerta de entrada y pueda ser más liviana. También se requiere blindaje neutrónico, con parafinas o compuestos bóricos.



Fig. 34

Durante los disparos de haces del TAC o el LINAC, solo puede estar en la sala el paciente, los trabajadores deben estar protegidos fuera de la habitación.

Es trabajo del radiofísico realizar mediciones periódicas de radiación en puntos concretos dentro y fuera de las habitaciones para asegurarse de que no existe ningún problema de protección o revestimiento y todo está dentro de los valores normales de radiación.

Tanto el personal que trabaja en las instalaciones, como las propias salas del complejo, deben estar controlados en todo momento por un dosímetro para asegurarse de que la dosis absorbida por el trabajador no supera los límites permitidos.



Fig. 35

Estos dosímetros personales (figura 35), generalmente termoluminiscentes (TLD), que el trabajador siempre debe llevar consigo, suelen colocarse enganchados en el bolsillo de la bata, y se envían mensualmente a una empresa que realiza las medidas de la dosis acumulada en los dosímetros. Dentro de los dosímetros hay dos detectores TLD, cada uno con un recubrimiento de densidad distinta que simulan las dosis superficial y profunda.

El límite permitido para cualquier trabajador que esté expuesto de forma continua a radiación es de 50 mSv al año, lo que equivale a 4,16 mSv mensuales (un Sievert es equivalente a un Gray para radiaciones electromagnéticas). En el caso de que se vea superado, se debe de hacer una revisión de las instalaciones o los protocolos para intentar minimizar dicha dosis. Este nivel es bastante holgado, teniendo en cuenta los niveles habituales de dosis que existen:

- Una radiografía de pecho conlleva unos 0,1 mSv.
- Una mamografía son 0,4 mSv.
- 2 mSv es la radiación que se recibe anualmente de forma natural.
- La tripulación de un vuelo transoceánico recibe al año 9 mSv.
- 10 mSv es un TAC completo de todo el cuerpo.
- 1.000 mSv produce vómitos, mareos y náuseas pero no la muerte.
- 5.000 mSv puede acabar con la vida del 50% de las personas expuestas.
- Con 10.000 mSv muere el 100% de las personas que lo reciben en pocas semanas.

6. CONTROLES DE CALIDAD

Una de las tareas más importantes del radiofísico en el hospital es encargarse de realizar los controles de calidad diarios, semanales y mensuales de los diferentes aparatos radiológicos (TAC, aceleradores y braquiterapia), asegurarse de su correcto funcionamiento y hacer calibraciones periódicas para corregir las posibles desviaciones que se puedan producir por el uso.

➤ BRAQUITERAPIA:

- El contenedor de la muestra cuenta con una videocámara en su interior para comprobar el correcto posicionamiento de las semillas.

- Este método cuenta también con una opción de autorradiografía, según la cual el radiofísico se encarga de comprobar que las dosis que emite la fuente son correctas situando una placa radiográfica en el lugar del paciente.

- En el momento que llega una fuente nueva para braquiterapia, el personal físico debe realizar una tabla de actividades diarias de la muestra (figura 36).

Ir-192 Tabla de actividades								
Source Serial Number: 02-07-0879-004-052113-11416-60								
T1/2 = 73.83 días								
Día	Fecha	Actividad (Ci)	Día	Fecha	Actividad (Ci)	Día	Fecha	Actividad (Ci)
0	21-may-13	11,416	61	21-jul-13	6,439	121	19-sep-13	3,666
1	22-may-13	11,309	62	22-jul-13	6,379	122	20-sep-13	3,631
2	23-may-13	11,204	63	23-jul-13	6,319	123	21-sep-13	3,598
3	24-may-13	11,099	64	24-jul-13	6,260	124	22-sep-13	3,564
4	25-may-13	10,995	65	25-jul-13	6,201	125	23-sep-13	3,531
5	26-may-13	10,892	66	26-jul-13	6,143	126	24-sep-13	3,498
6	27-may-13	10,791	67	27-jul-13	6,086	127	25-sep-13	3,465
7	28-may-13	10,690	68	28-jul-13	6,029	128	26-sep-13	3,433
8	29-may-13	10,590	69	29-jul-13	5,973	129	27-sep-13	3,400
9	30-may-13	10,491	70	30-jul-13	5,917	130	28-sep-13	3,369
10	31-may-13	10,393	71	31-jul-13	5,862	131	29-sep-13	3,337
11	01-jun-13	10,296	72	01-ago-13	5,807	132	30-sep-13	3,306
12	02-jun-13	10,200	73	02-ago-13	5,753	133	01-oct-13	3,275
13	03-jun-13	10,104	74	03-ago-13	5,699	134	02-oct-13	3,245
14	04-jun-13	10,010	75	04-ago-13	5,646	135	03-oct-13	3,214
15	05-jun-13	9,916	76	05-ago-13	5,593	136	04-oct-13	3,184
16	06-jun-13	9,824	77	06-ago-13	5,541	137	05-oct-13	3,154
17	07-jun-13	9,732	78	07-ago-13	5,489	138	06-oct-13	3,125
18	08-jun-13	9,641	79	08-ago-13	5,438	139	07-oct-13	3,096
19	09-jun-13	9,551	80	09-ago-13	5,387	140	08-oct-13	3,067
20	10-jun-13	9,462	81	10-ago-13	5,336	141	09-oct-13	3,038

Fig. 36

➤ TAC:

- Las calibraciones de TAC consisten básicamente en realizar escaneados de maniqués cuya densidad en cada punto es conocida y comprobar que las imágenes obtenidas en el ordenador se corresponden a los valores de dichos maniqués.

- Otra fuente de problemas en esta sala es el calibrado de los láseres. Normalmente son estructuras que no sufren mucha desviación, pero al tener una importancia clave en el tratamiento, es importante que estén bien situados y orientados.

➤ LINAC:

- Al igual que ocurre en la sala de simulación con el TAC, los láseres deben de estar perfectamente calibrados, en este caso señalando el isocentro del *Gantry* del acelerador. Para localizar el isocentro cuando los haces ya están calibrados, se coloca una aguja en la mesa del acelerador y se mueve hasta encontrar el cruce de los láseres en la punta de la misma.

- Al comienzo del día se debe hacer una comprobación rutinaria con una matriz de detectores. También se usan “maniqués”, seis placas de 1 cm de material plástico con una placa radiográfica en medio, para ver si la dosis que llega a la placa central se corresponde con lo diseñado en el planificador.

- Para medir la distribución de dosis que proporciona el acelerador lineal, se utiliza mensualmente un recipiente de dimensiones 100 x 50 x 50 cm repleto de agua y abierto por su cara superior. En su interior se sitúa un detector sobre un sistema de tres tubos que hacen que se pueda mover en las tres dimensiones del espacio recogiendo medidas.



Fig. 37
Cubeta de agua en
el LINAC



Fig. 38

El detector (figura 38) es una cámara de ionización conectada a un electrómetro que mide la carga producida y la expresa como dosis relativa. Los resultados de las mediciones se muestran en gráficas en las que se ve la dosis relativa en función de la posición del dosímetro respecto a los ejes centrales del haz. Se tiene que observar un

máximo en forma de meseta plana en las direcciones x e y alrededor de los ejes $x=0$ e $y=0$. En la dirección z , profundidad, se tiene que observar un decaimiento a medida que se va separando el detector del origen del haz.

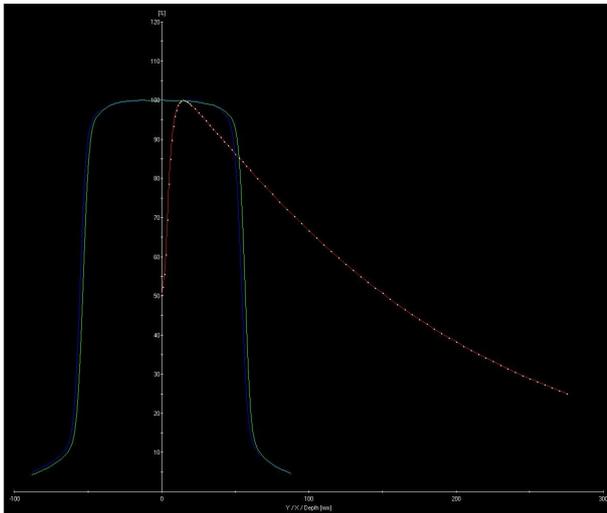


Fig. 39

En la representación de la figura 39 se ven las distribuciones de dosis a lo largo de los ejes X e Y prácticamente solapadas, mientras que se ve el decaimiento en profundidad.

7. CONCLUSIÓN

A lo largo de este trabajo hemos visto la importancia que tiene la radioterapia actualmente en el ámbito de tratamientos tumorales, siendo la principal vía de lucha contra el cáncer. Pese a los grandes avances que ha habido en equipos de radioterapia en España en los últimos años, el número de unidades por millón de habitantes sigue muy por debajo de lo que se registra en el resto de países importantes de Europa.

También hemos contemplado los distintos tipos de radioterapia que existen así como el personal implicado en la misma. Nos hemos centrado en un caso de cáncer de próstata y hemos avanzado paso a paso por las distintas etapas de su tratamiento.

Con este trabajo he logrado acercarme a la profesión del radiofísico y su trabajo diario en la planificación de tratamientos, mediciones periódicas de radiación y controles de calidad. A través de mis visitas al Hospital Campo Grande de Valladolid, he podido ver aplicados de forma práctica, y en ambiente laboral, los diversos conocimientos adquiridos en el máster, especialmente en los campos de equipos de radiodiagnóstico (TAC) y radioterapia (LINAC), atenuación de fotones, dosis en tejidos corporales y dosímetros.

8. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a Pilar Íñiguez de la Torre, tutora del trabajo, su colaboración y ayuda, así como disponibilidad y el ofrecimiento desde el primer día de curso.

También quiero agradecer a los radiofísicos Antonio Ruiz Bueno y Carlos Andrés Rodríguez, que han dedicado horas de su trabajo y tiempo libre en enseñarme los entresijos de su profesión y han sido claves para la construcción de este trabajo. Por su amabilidad y paciencia, les estoy muy agradecido.

Y una mención especial al equipo de profesores que nos ha impartido este máster, sin cuya dedicación y horas no habría podido salir adelante.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. PODGORSK, E.B. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. 2005. ISBN: 92-0-107304-6
2. *Fundamentos de Física Médica*. Sociedad española de física médica. *Volumen 3*. ISBN: 978-84-938016-7-0
3. ICRU (International Commission on Radiation Units & Measurements) report 50. 1993.
4. ICRU report 62. 1999.
5. MILLÁN CEBRIAN, E. *Módulo 4: Bases físicas, equipos y control de calidad en Radioterapia Externa*. Madrid y Zaragoza.
6. URDIALES GARCÍA, C., CORDERO GAGO, I., GÓMEZ FERNÁNDEZ, N., BARREALES LÓPEZ, R. y MARTÍNEZ ARIAS, R. *La radioterapia paso a paso desde cerca*. 2005. Zamora.
7. España. Real decreto 1841/1997, de 5 de diciembre *por el que se establecen los criterios de calidad en medicina nuclear*. Boletín Oficial del Estado, 19 de diciembre de 1997, núm 303, p. 37137-37143
8. España. Real decreto 1566/1998, de 17 de julio *por el que se establecen los criterios de calidad en radioterapia*. Boletín Oficial del Estado, 28 de agosto de 1998, núm. 206, p. 29383-29394.
9. España. Real decreto 1836/1999, de 3 de diciembre *por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas*. Boletín oficial del Estado, 31 de diciembre de 1999. núm 313. p. 46463-46482

10. Páginas web consultadas:

- SEOR. Sociedad Española de Oncología Radioterápica.
<<http://www.seor.es/index.asp?P=0&IDM2=12&ID=4&IDM3=0>>

- Base de datos de la OCDE sobre la salud 2012
<<http://www.oecd.org/spain/BriefingNoteESPANA2012inSpanish.pdf>>

- Sociedad Española de Oncología Médica. *El cáncer en España 2013*. 31 de enero de 2013.
<<http://www.seom.org/es/prensa/el-cancer-en-espanya.com/104018-el-cancer-enespana-2013>>

- Instituto Urológico Ignacio Galmés Belmonte.
<<http://www.institutourologicoigb.com/servicios/fotovaporizacion-del-adenoma-de-prostata-con-laser>>

- Cuaderno de prácticas de radioterapia. 28 de febrero de 2010.
<<http://tecnicoderadioterapia.blogspot.com.es/2010/02/simulacion.html>>

- Prostate images: <<http://www.netterimages.com/image/prostate.htm>>