



Facultad de Ciencias
Universidad de La Laguna

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio dosimétrico de los aplicadores para el ioRT-50

Grado en Física
Julio 2023

Realizado por:

Ana Mary Carrillo Padrón

Dirigido y supervisado por:

Fernando Fernández Belmonte

Manuel Eulalio Torres Betancort

INDICE

Agradecimientos	3
Resumen.....	4
Abstract.....	5
Motivación	6
1 Introducción.....	7
1.1 Objetivos.....	7
1.2 Radioterapia intraoperatoria.....	7
1.3 ioRT-50.....	8
1.4 Dosimetría.....	10
1.5 Cáncer de Mama.....	11
2 Metodología	13
2.1 Materiales.....	13
2.1.1 Cámara de ionización.....	13
2.1.2 Electrómetro	14
2.1.3 Barómetro y termopar	14
2.1.4 Películas radiocrómicas.....	15
2.1.5 Cuba de agua	16
2.1.6 Placas de PMMA	17
2.2 Montaje y obtención de imágenes.	17
2.2.1 Calibración	17
2.2.2 Tira sensitométrica.....	18
2.2.3 Distribución de dosis de los aplicadores	19
2.3 Desarrollo del software.....	21
3 Discusión y resultados	26
3.1 Funcionalidad del programa.....	29
4 Conclusiones	30
5 Anexos	31
5.1 Películas XR-RV3	31
5.2 Películas EBT3.....	47
5.3 Archivo .txt	66
5.4 Tabla de datos.	66
6 Bibliografía	72

Agradecimientos

Agradecer a toda mi familia, a mis amigos y a toda esa gente que permaneció y la que se fue de mi lado por hacerme la persona que soy ahora. Gracias a mis tutores por darme la oportunidad que siempre deseé y enseñarme una mínima parte de lo que es la Física Médica. Gracias.

Resumen

La Física Médica es una de las ramas de la física que se encarga principalmente de aplicar los principios de esta para la prevención, diagnóstico y tratamiento en enfermedades. El sector de la radiofísica hospitalaria, incluido en esta rama, se ocupa de la correcta aplicación e investigación de la radiación ionizante en el ser humano. Hoy en día se dispone de equipos como la ioRT-50 (Intraoperative Radiation Therapy - 50 keV), localizada en el Complejo Hospitalario Universitario de Canarias (CHUC) que se encarga de utilizar radiación ionizante con el fin de ayudar a pacientes que lo necesiten. En este caso en concreto, la ioRT-50 se está utilizando para realizar técnicas de radioterapia superficial y radioterapia intraoperatoria, especialmente para el tratamiento de cáncer de mama en sus primeras fases.

La ioRT-50 da tratamiento mediante unos aplicadores. Se medirá la distribución de radiación emitida por los aplicadores mediante dos tipos diferentes de películas radiocrómicas, la EBT3 y la XR-RV3. Para hacer este procedimiento se calibrará y comprobará el estado de la ioRT-50, mediante la realización de una comparación entre las dos películas radiocrómicas. Para evaluarlas se usará el programa ISOANA, creado con el objetivo de obtener la dosimetría de los aplicadores esféricos de la ioRT-50.

La finalidad de todo este procedimiento es evaluar el programa, ISOANA, para determinar si cumple con su propósito de analizar imágenes irradiadas y minimizar el tiempo requerido para comprobar el estado de la ioRT-50 y sus aplicadores. A su vez, se quiere averiguar qué película radiocrómica es mejor para comprobar el estado de la ioRT-50. Para ello se observará su simetría, las dosis a 5 mm del aplicador, el valor del coeficiente de determinación de los ajustes y los daños producidos en la película al hacer la medida.

Abstract

Medical physics is one of the branches of physics that is mainly responsible for applying the principles of this for the prevention, diagnosis and treatment of diseases. The sector of hospital radiophysics, included in this branch, deals with the correct application and research of ionizing radiation in humans. Today we have equipment such as the ioRT-50 (Intraoperative radiation therapy - 50 keV), located at the University Hospital of the Canary Islands (HUC) that is responsible, as we said before, for using ionizing radiation in order to help patients who need it. In this particular case, ioRT-50 is being used to perform superficial radiotherapy techniques and intraoperative radiotherapy, especially for the treatment of breast cancer, in its early stages.

ioRT-50 provides treatment using applicators. The distribution of radiation emitted by the applicators will be measured by two different types of radiochromic films, EBT3 and XR-RV3. To do this procedure, the status of the ioRT-50 will be calibrated and checked by making a comparison between the two radiochromic films. To evaluate them, the ISOANA program will be used, created with the objective of obtaining the dosimetry of the spherical applicators of the ioRT-50.

The intention of this procedure is to evaluate the program, ISOANA, to determine if it fulfills its purpose of analyzing irradiated images and minimize the time required to check the status of the ioRT-50 and its applicators. In turn, we want to find out which radiochromic film is best to check the status of the ioRT-50. For this, its symmetry, the doses at 5 mm of the applicator, the value of the coefficient of determination of the adjustments and the damage produced in the film when making the measurement will be observed.

Motivación

Mi motivación para entrar en la carrera fue tener la oportunidad de entender un poco más el universo y el mundo que nos rodea, aunque después de haberla cursado, solo te cuestionas más las cosas y llegas a entender que lo que te han dado en todos estos años solo es la punta del iceberg.

En el grado dan lo esencial de la física, no tocando todas ramas de esta, como es la Física Médica, pero para mí, fue esta una de las razones que hizo decidirme hacer esta carrera. Fue el poder conectar todos los conocimientos físicos con los de la biología, la informática y otras diversas áreas para poder ayudar a las personas, lo que me hizo decidirme.

La Física Médica es una rama interesante en la cual queda bastante por desarrollar y mucho por aprender. Digo todo esto porque, para mí, es la gran motivación para hacer este trabajo.

1 Introducción

The objectives of the Final Degree Project (TFG) is to carry out a dosimetric study of the spherical applicators of the ioRT-50. In addition, it seeks to compare the radiation response of two types of radiochromic films, and evaluate the effectiveness of a software, called ISOANA, designed to analyze the distribution of doses in irradiated films.

1.1 Objetivos

Los objetivos del Trabajo Fin de Grado (TFG) es la realización de un estudio dosimétrico de los aplicadores esféricos de la ioRT-50. Además, se busca comparar la respuesta a la radiación de dos tipos de películas radiocrómicas, y evaluar la eficacia de un software, denominado ISOANA, diseñado para analizar la distribución de dosis en películas irradiadas.

1.2 Radioterapia intraoperatoria

La radioterapia intraoperatoria (IntraOperative Radiation Therapy, IORT) es un procedimiento en el que se destruye tejido tumoral, mediante el empleo de altas dosis de radiación ionizante. Esta irradiación se realiza en el quirófano tras la extirpación del tumor, garantizando así la eliminación de células tumorales que pudieran haberse extendido fuera del volumen principal. Una vez apagado y retirado el equipo, los médicos cierran la incisión y termina la cirugía. Las células irradiadas, con una dosis suficientemente alta, morirán a lo largo de los días siguientes, siendo desechadas y absorbidas por el organismo del paciente [1-2].

La radioterapia es una técnica que lleva en uso más de treinta años. Este tipo de tratamientos no solo se utilizan para la eliminación de tejido tumoral también para tratamientos paliativos, donde el objetivo es limitar el crecimiento, la extensión y la inflamación producida por el tumor. La radioterapia se clasifica en dos tipos: la radioterapia de haz externo y la radioterapia interna, usándose uno u otro dependiendo de diferentes factores como tipo de cáncer, tamaño y ubicación del tumor, entre otros. La radioterapia de haz externo emplea equipos como los aceleradores de electrones (ALEs) y aparatos de emisión de Rayos-X, permite la irradiación de los tumores desde fuentes

exteriores al paciente. La radioterapia interna, por su parte, emplea fuentes o equipos que se introducen dentro del cuerpo del paciente. Estas fuentes pueden ser radiactivas y estar selladas (braquiterapia) o pueden introducirse en el paciente mediante radiofármacos (terapia metabólica) [1].

1.3 ioRT-50

El ioRT-50 es un equipo de *radioterapia intraoperatoria y superficial* (Imagen 1). Está constituido por un carro móvil con un brazo articulado que sostiene un tubo de Rayos X y un aplicador, controlado vía WIFI mediante un PC con el software RadControl II (Imagen 2.a). Este equipo es fabricado por la empresa Eckert & Ziegler-Womed, en Alemania [3-4].

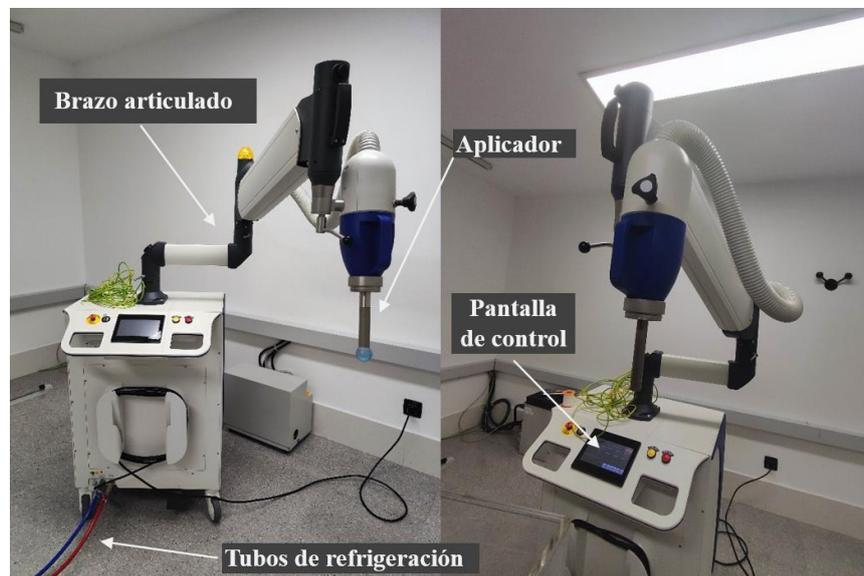


Imagen 1: ioRT-50.

El aplicador ha sido diseñado para filtrar selectivamente el haz de radiación, produciendo un haz con la simetría deseada. Los aplicadores que emplea la ioRT-50 son esféricos (usados en radioterapia intraoperatoria) o cónicos (usados en radioterapia superficial) (Imagen 2.b).



Imágenes 2: a) software RadControl II. b) Aplicadores esféricos y cónicos.

La casa comercial ha desarrollado dos tipos de aplicadores esféricos. Los primeros son de aluminio y PVC, que presentaban la desventaja de ser muy sensibles al uso y los procedimientos de esterilización. Los segundos están realizados exclusivamente con PVC, lo que los hace más fáciles de esterilizar. A los aplicadores esféricos se les denomina SP35, SP40, SP45, SP50 y SP55. SP significa “spherical” y el número indica el diámetro en milímetros que tenga.

El equipo está completamente blindado, excepto donde se coloca el aplicador. El haz de radiación que transmite el aplicador proviene de un tubo de rayos X que se encuentra en el extremo del brazo articulado del equipo. Este está formado por un tubo de vacío, un sistema productor de electrones y un generador que permite acelerarlos entre un cátodo y un ánodo, que actúa como blanco. Para producir los electrones se aplica una corriente eléctrica al cátodo, aumentando la temperatura de esta, permitiendo que los electrones abandonen su superficie por emisión termoiónica. Estos electrones son acelerados mediante una diferencia de potencial hasta colisionar con el ánodo (de tungsteno, habitualmente) (Imagen 3). La interacción de los electrones de alta energía con el ánodo es lo que produce los rayos X. El 99% de la energía cinética de los electrones se pierde en forma de calor y solo 1% se transforma en rayos X. Por esta razón la ioRT-50 se refrigera a partir de un circuito cerrado de agua. [1,2,5]

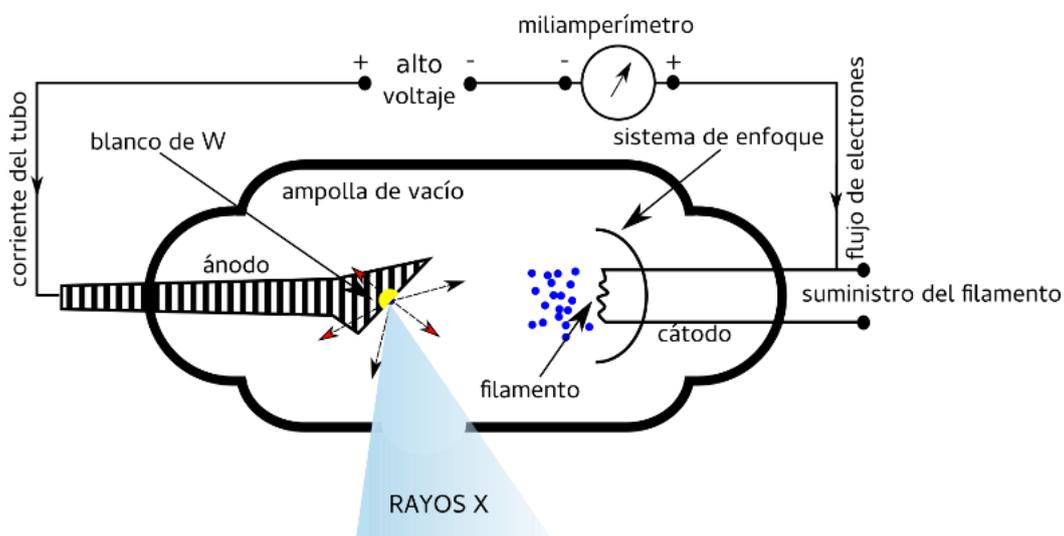


Imagen 3: Gráficos que representa un tubo de rayos X.

La radiación emitida por el equipo son rayos X de baja energía. No todos los fotones que salen del tubo de rayos X tienen una energía suficiente para atravesar al paciente, por esto en los equipos de Radiodiagnóstico se colocan filtros para absorber estos fotones que no aportan ningún beneficio al diagnóstico. Estos filtros deben ser al menos equivalentes a 1,5 mm de ancho de una lámina de

aluminio (Al) para voltajes menores de 70 kV y de 2,5 mm para voltajes mayores. En el caso de la ioRT-50, que es un equipo terapéutico que trabaja a una tensión máxima de 70 kV, el haz sale filtrado por 0,5 mm de agua refrigerante, 0,5 mm de titanio (Ti) que dan soporte estructural al tubo y 0,5 mm del propio ánodo de cobre.

1.4 Dosimetría

La dosimetría es la rama de la ciencia que se ocupa de la medida de la dosis absorbida por un material o tejido como consecuencia de su exposición a las radiaciones ionizantes presentes en un campo de radiación. Esta medida depende de varios factores como la naturaleza de radiación, su energía, su intensidad y las características en el medio en el que se produce [6].

En general, la dosimetría la podemos clasificar en dos tipos: *relativa* y *absoluta*. La *dosimetría relativa* expresa la dosis en porcentaje ya que compara la lectura medida en un punto, bajo ciertas condiciones de radiación, con otro de referencia. La *dosimetría absoluta*, por otro lado, es la determinación de la dosis (medida en Gray, Gy) absorbida en un punto [7].

Cuando hablamos de dosis de radiación debemos tener cuidado y ser precisos, debemos distinguir entre dosis absorbida, dosis equivalente, dosis efectiva, tasa de dosis... La *dosis absorbida* es la energía radiante absorbida por unidad de masa de materia irradiada, y se expresa en unidades de J/kg o Gy. La *tasa de dosis absorbida* se refiere a la dosis absorbida por unidad de tiempo. La dosis equivalente, es la dosis absorbida en un órgano o tejido, multiplicada por un factor de ponderación cuyo valor depende del tipo de radiación. Este factor de ponderación hace referencia al daño biológico producido por las diferentes partículas ionizantes. La dosis efectiva, por último, promedia de forma ponderada la dosis equivalente recibida en todo organismo. Los factores de peso tienen en cuenta las diferentes sensibilidades a la radiación de los órganos y tejidos [8].

Para hallar los efectos que podría producir la ioRT-50 se hacen dos tipos de graficas: la *PDD* (dosis absorbida-profundidad) y la *tasa de dosis-profundidad*. La *PDD* indica la dosis absorbida en un cierto ángulo con respecto al centro del aplicador a diferentes profundidades. La *tasa de dosis-profundidad* muestra las tasas de dosis en un cierto ángulo con respecto al centro del aplicador a diferentes profundidades. En otras palabras, muestra la dosis absorbida por minuto en una dirección.

1.5 Cáncer de Mama

En el CHUC, la ioRT-50 se usa exclusivamente para el tratamiento de cáncer de mama, enfermedad que afecta a más de 2,2 millones de personas al año en España. Con el objetivo de contextualizar este trabajo, en los siguientes párrafos se explicará qué es el cáncer de mama y cuál es el procedimiento quirúrgico en el que se utiliza este equipamiento [9].

El cáncer de mama se define como la proliferación descontrolada y maligna de las células de la mama. Se clasifica dependiendo de las células que se vuelven cancerosas: lobulillos, conductos y tejido conectivo. Los lobulillos son las glándulas que producen leche, los conductos son los tubos que transportan la leche al pezón y el tejido conectivo (formado por tejido fibroso y adiposo) es el que rodea y sostiene todas las partes de la mama. La mayoría de los cánceres de mama comienzan en los conductos o en los lobulillos [10].

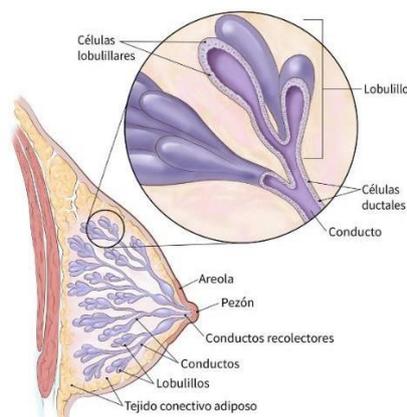


Imagen 6: Partes de la mama.

Los subtipos de cáncer de mama se clasifican por el sistema TNM que se basa en: el tamaño del tumor (T), su extensión a los ganglios linfáticos regionales (N) y/u otras partes del cuerpo (M). La clasificación nombra a los distintos subtipos como estadios [11]:

- Estadio 0 o carcinoma in situ: aparición de células anómalas.
- Estadio 1: mide menos o igual a 2 cm y hay ausencia de afección de ganglios linfáticos y metástasis.
- Estadio 2: tumor de entre 2 y 5 cm, con o sin afección de ganglios.
- Estadio 3: tumor con ganglios afectados y/o piel y pared torácica.
- Estadio 4: Se ha diseminado a otras partes del cuerpo.

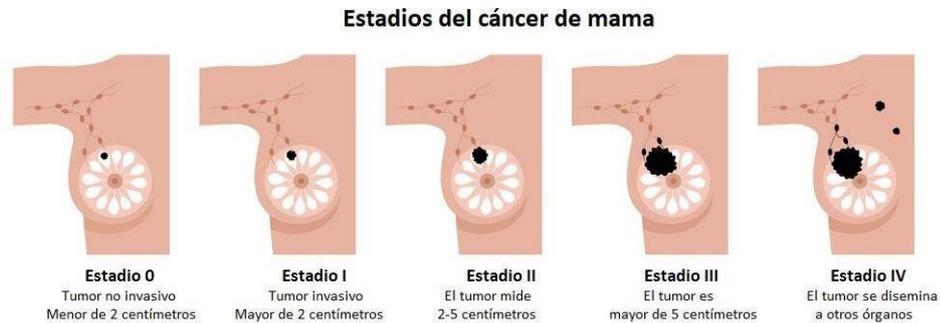


Imagen 7: Estadios del cáncer de mama.

El tumor se puede extender fuera de la mama a través de los vasos linfáticos y los sanguíneos, a esto se le denomina metástasis [10].

La cirugía, radioterapia y quimioterapia son los tratamientos para combatir esta enfermedad. El tratamiento depende de muchos factores, como, por ejemplo, la edad, el sexo, la presencia de otras enfermedades y también del estadio en el que se encuentre el cáncer.

La irradiación con la IORT-50 se usa como tratamiento junto con la cirugía. Una vez extirpado el tumor en el quirófano, se evalúan los ganglios linfáticos ("biopsia del ganglio centinela"). Para ello, se inyecta previamente un trazador radiactivo en el tumor, nanocoloide de Tecnecio 99 (Tc -99m). Este trazador permite identificar los ganglios linfáticos que podrían estar afectados por células cancerosas del tumor. Estos ganglios son extirpados durante la cirugía y llevados a Anatomía Patológica, donde se analizarán. Si están libres de tejido tumoral se seguirá con el procedimiento, se colocará el aplicador esférico en la cavidad, administrando una dosis alta de radiación de una sola vez, y finalizando así el proceso. Si no, la irradiación de la mama se realizará siguiendo un procedimiento convencional de Radioterapia Externa [12].

2 Metodología

The following paragraphs explain the materials and steps used to obtain the dosimetry of spherical applicators. Before evaluating the dosimetry of the applicators with a software created exclusively for it, the equipment is calibrated and the sensitometric strip of the films used: EBT3 and XR-RX3. In addition, the following sections detail the operation of the software used to evaluate the dosimetry of the applicators, as well as all the materials necessary to analyze it.

2.1 Materiales

2.1.1 Cámara de ionización

Una *cámara de ionización* es un dispositivo que detecta la radiación ionizante. La cámara de ionización (Imagen 8) es un recipiente con gas y dos electrodos (un cátodo y un ánodo) con un voltaje fijo insuficiente como para producir la ionización en el gas. Cuando los rayos-X entran en una cámara de ionización, los fotones son capaces de ionizar las moléculas. Los iones producidos son entonces atraídos hacia los electrodos y la carga que se acumula es medida con un electrómetro. Cuanto mayor es la radiación incidente, mayor es la carga recogida. Los elementos ionizados del gas se mueven a los electrodos de signo opuesto recogiendo así la carga emitida [nC].



Imagen 8: Cámaras de Ionización.

Las cámaras de ionización son utilizadas para calibrar la IORT-50. Una vez calibrado el equipo, es necesario realizar verificaciones periódicas para garantizar su óptimo funcionamiento. En particular, se realiza un control de calidad antes de cada tratamiento. En este control se comprueba el

funcionamiento general del equipo y que la tasa de dosis y la calidad del haz se mantienen en su estado de referencia.

2.1.2 Electrómetro

El electrómetro (Imagen 9) es un multímetro que mide la carga de las partículas ionizadas por la radiación. La dosis absorbida es proporcional a esta carga y la constante de proporcionalidad nos la da el certificado de calibración del equipo.



Imagen 9: Electrómetro.

2.1.3 Barómetro y termopar

Para realizar medidas con una cámara de ionización abierta debe tenerse en cuenta el efecto de la presión y temperatura sobre la lectura de la carga recogida. Dado este factor, al realizar la calibración, es necesario contar con un barómetro y un termopar (Imagen 10) para poder ajustar las medidas y asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos.



Imagen 10: Barómetro y termopar.

La dosis que nos da la cámara de ionización se calcula según el protocolo TRS-398 de la siguiente manera:

$$D = Q * K_{PT} * K_q * N_{D,W} [Gy] \quad (1)$$

Q – Carga.

K_q - Factor de corrección.

K_{PT} - Factor Temperatura y Presión.

$N_{D,W}$ - Factor de calibración del detector.

Las medidas que se obtiene dependen de tres factores (Ecuación 1) factor temperatura y presión (K_{PT}), un factor de corrección (K_q) y un factor de calibración del detector ($N_{D,W}$). Estos dos últimos mencionados se encuentran en el Calibration Certificate (PTW) que dispone el hospital (Tabla 1) con los siguientes valores:

Magnitud	Valor
K_q	1,025(70kV, 4mmAl)
$N_{D,W}$	$1,542 * 10^9 \text{Gy/C} = 1,542 \text{Gy/nC}$

Tabla 1: Valores del factor de corrección y el factor de calibración del detector

En cuanto al factor de temperatura y presión (Ecuación 2) se calcula de la siguiente manera:

$$K_{PT} = \frac{T * 1 \text{atm}}{P * 293 \text{K}} \quad (2) \quad T - \text{Temperatura} \quad P - \text{Presión}$$

Con estos factores corregiremos el valor dado por el electrómetro y obtenemos el valor definitivo de la dosis absorbida.

2.1.4 Películas radiocrómicas

Las películas radiocrómicas son un dosímetro compuesto por diversas láminas. Contienen un material activo sensible a la radiación que se oscurece en función de la dosis que ha absorbido. Las películas radiocrómicas se utilizan para obtener imágenes irradiadas y comprobar la estabilidad de los aplicadores de la IORT-50, entre otras cosas. Para desarrollar este trabajo se han utilizado dos tipos de películas: XR-RV3 y EBT3.

Las películas EBT3 (Imagen 11) está formada por tres láminas, siendo una de ellas material activo y las otras dos de poliéster. Estas películas son usadas para medir dosis absorbida de alta energía por lo que tienen mayor optimización para energías superiores a 100 keV.

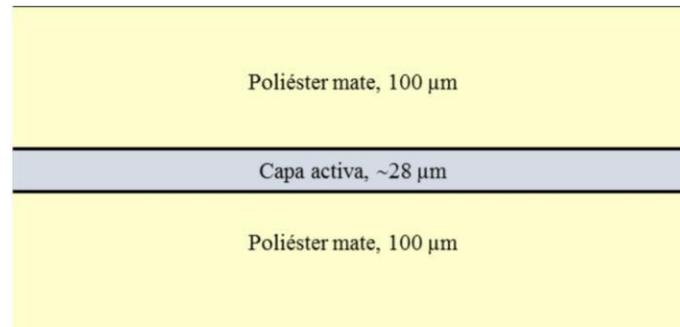


Imagen 11: Estructura película EBT3.

Las películas XR-RV3 (Imagen 12) de la marca Ashland constan de cinco láminas en su estructura. El material activo se encuentra en el centro de la película. Por un lado, está recubierto con una lámina de material adhesivo, seguida de una lámina de poliéster naranja. Por el otro lado, se encuentra cubierto por una capa superficial, seguida también por una lámina de poliéster blanca. Estas láminas están diseñadas para energías inferiores a 100 keV. Como la IORT-50 trabaja a bajas energías, estas películas deberían de dar mejores resultados en el análisis que las EBT3.

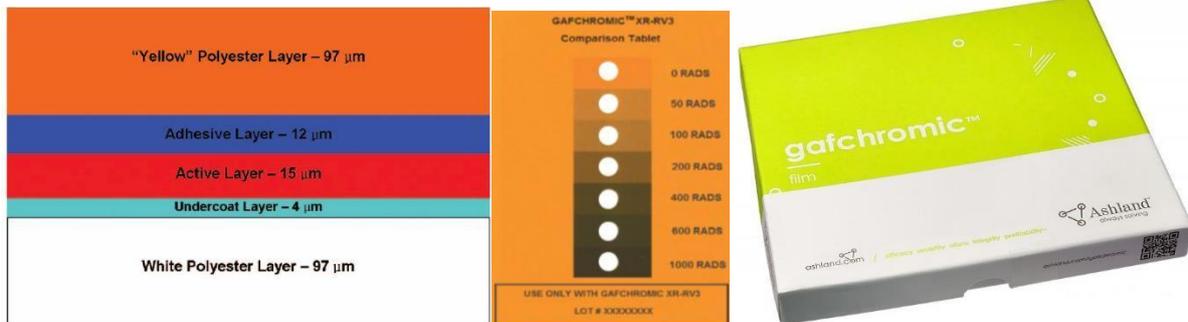


Imagen 12: Capas XR-RV3.

2.1.5 Cuba de agua

Consiste en un depósito de agua (Imagen 13) de gran tamaño (600x500x408 mm³), el cual funciona como un maniquí de agua líquida. Los dispositivos dosimétricos se colocan dentro del depósito de agua, donde se exponen a la radiación. Este sistema proporciona un método eficaz y preciso para la determinación de la dosis de radiación en procedimientos médicos.



Imagen 13: Cuba de Agua.

2.1.6 Placas de PMMA

Las placas de PMMA (Imagen 14) son láminas de polimetilmetacrilato utilizadas para simular el cuerpo humano a la hora de hacer ciertas medidas con la IORT-50. Tienen una densidad similar a la del agua y un espesor variable, entre 1 y 10 mm.

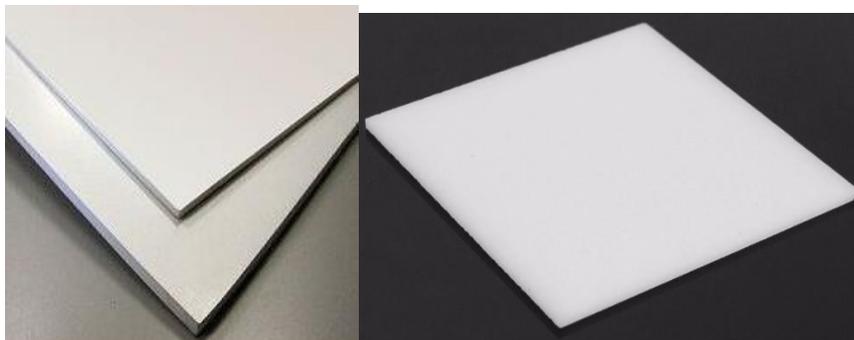
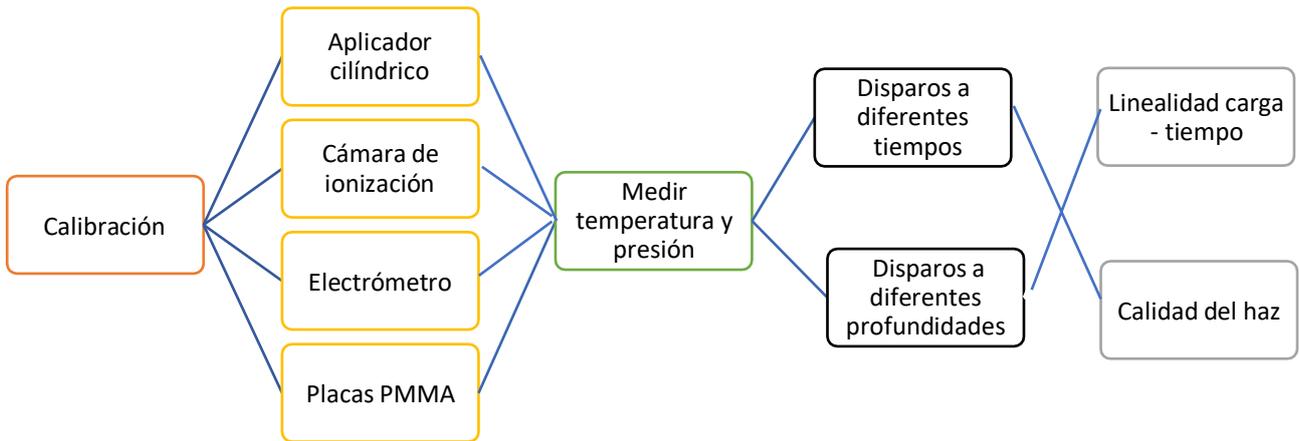


Imagen 14: Placas PMMA.

2.2 Montaje y obtención de imágenes.

2.2.1 Calibración

Para una mayor comprensión del proceso de calibración se presenta el siguiente esquema:



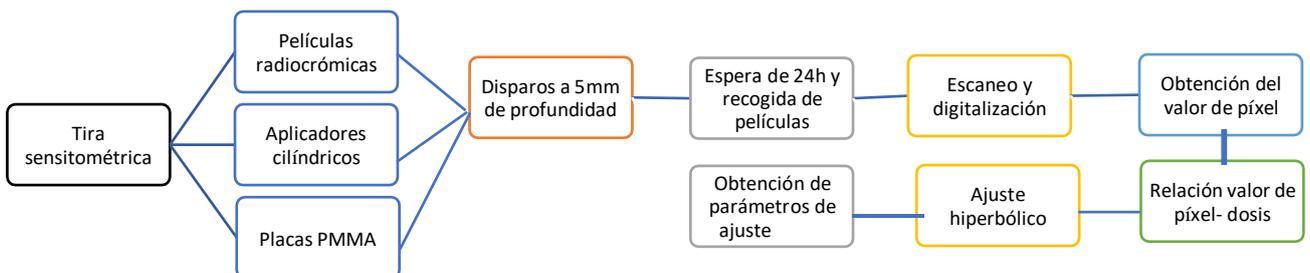
Esquema 1: Calibración de la ioRT-50.

Lo primero que se debe de hacer es calibrar la ioRT-50. Para ello, se dispara varias veces a distintos tiempos y a diferentes profundidades a una cámara de ionización que se encuentra dentro de una placa de PMMA. La cámara está conectada al electrómetro, que medirá las cargas liberadas por el haz de radiación. Los tiempos y las cargas recogidas de la cámara de ionización, al igual que la presión y temperatura, son colocadas en una hoja de cálculo para verificar la linealidad carga-tiempo y la calidad del haz. Comparando estos dos parámetros con magnitudes anteriormente recogidas, hacemos la calibración.

La *calidad del haz* se calcula a través del cociente entre la dosis a 5 mm y la dosis superficial. Este factor indica la variación del espectro del haz a lo largo del tiempo. Un cambio de más de un 5% podría indicar que el tubo, el ánodo/blanco o el filtro están desgastándose.

2.2.2 Tira sensitométrica

Antes de explicar que es una tira sensitométría se ha esquematizado como se obtiene:



Esquema 2: Obtención de una tira sensitométrica.

Una tira sensitométrica (Imagen 15) es un conjunto de películas radiocrómicas, irradiadas a distintas dosis, que nos permite establecer una relación entre el oscurecimiento de la película y la dosis recibida. Dado que la prescripción clínica es a 5 mm de profundidad, las irradiaciones se realizaron con las películas bajo una plancha de 5 mm de PMMA, sobre un maniquí de 7 cm de PMMA. Transcurridas 24 h desde la irradiación, las películas eran escaneadas y analizadas con el software gratuito ImageJ [13]. A mayor oscurecimiento de la película menor es el valor de píxel medido en la misma. Siguiendo las recomendaciones de los fabricantes de las películas, se realizó un ajuste hiperbólico (Ecuación 3) de los valores de píxel y las dosis absorbidas.

$$D = a + \frac{b}{V_p - c} \quad (3) \quad D - \text{Dosis} \quad V_p - \text{Valor de píxel}$$

Gracias al ajuste se obtienen los valores a, b y c. Esto permite usar la película para medir la radiación emitida por el equipo y recibida por el paciente. Este proceso se ha realizado en ambas películas radiocrómicas mencionadas.

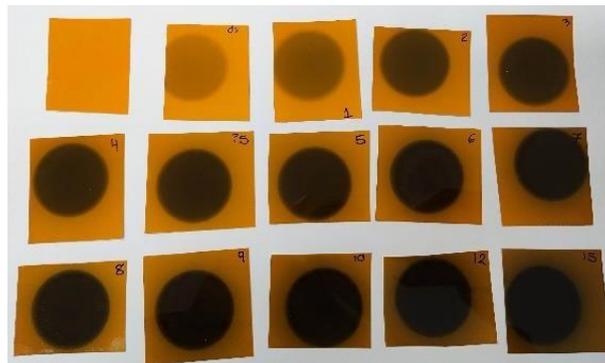
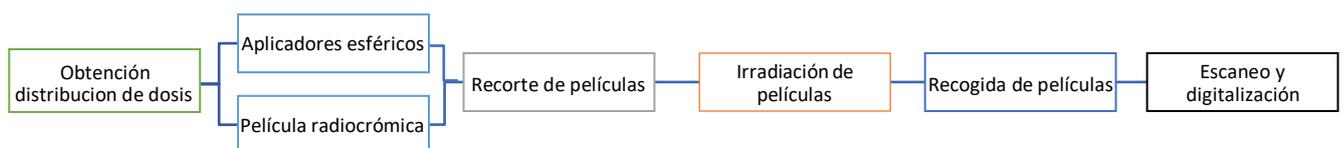


Imagen 15: Tira sensitométrica de XR-RV3.

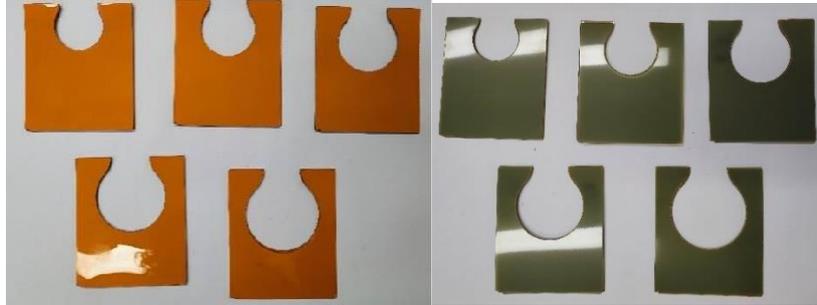
2.2.3 Distribución de dosis de los aplicadores

Para visualizar mejor como se obtiene la distribución de dosis de los aplicadores se ha hecho el siguiente esquema:



Esquema 3: Obtención de la distribución de dosis

Para obtener la distribución de dosis de los aplicadores esféricos, se recortaron las películas con mismo contorno (Imagen 16).



Imágenes 16: a) Películas radiocrómicas XR-RV3. b) Películas radiocrómicas EBT3.

Estas películas se cortan tanto con láser como a mano y se colocan sobre los aplicadores con un marco como soporte. Este marco está diseñado específicamente para este propósito. Posteriormente, las láminas se irradian por la IORT-50 dentro de la cubeta de agua (Imagen 17).

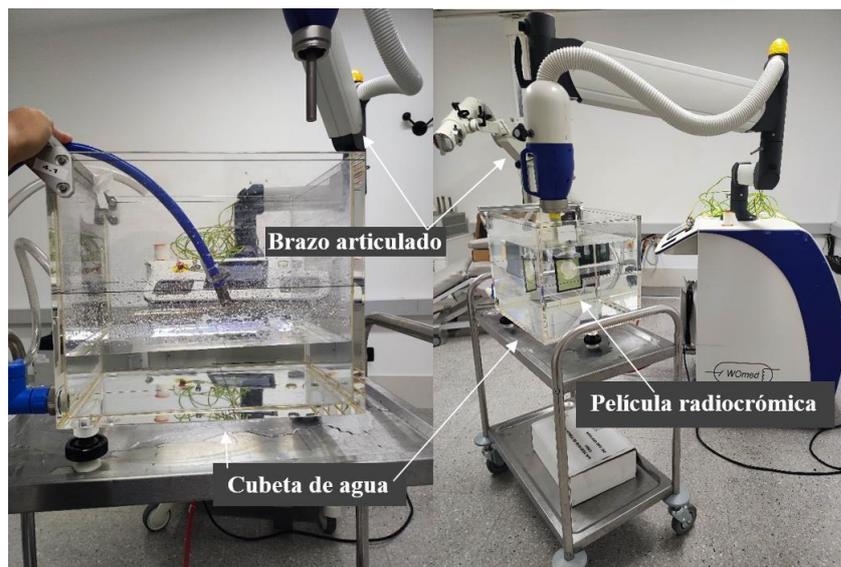


Imagen 17: Cubeta de Agua.

Para cada aplicador se cortaron varias láminas, ya que a la hora de irradiar se harán disparos con diferentes tiempos. Obtenidas las láminas irradiadas, se espera 48h y se escanean para el posterior análisis.

2.3 Desarrollo del software

El software utilizado para el análisis de imágenes irradiadas se ha desarrollado en el lenguaje de programación Python y consta de alrededor de 1000 líneas de código. Varias de las librerías utilizadas para su creación son: Tkinter, Matplotlib, Pandas y Numpy, entre otras. El nombre que se le ha dado al programa es ISOANA (Imagen 18). Este programa será utilizado para analizar imágenes irradiadas producidas por aplicadores esféricos.

En la siguiente imagen se puede observar la interfaz al abrir el programa:

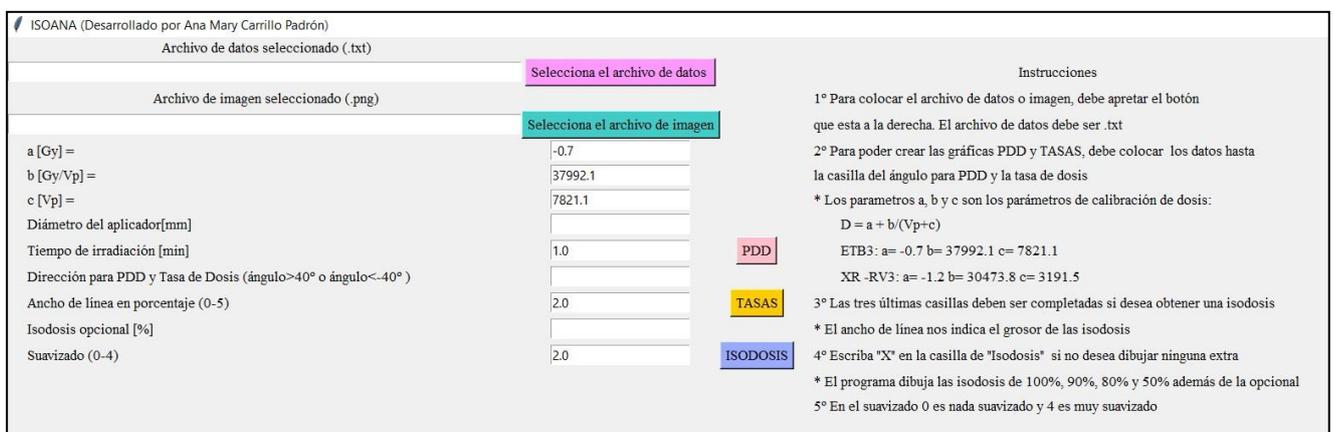


Imagen 18: La interfaz de ISOANA.

Para realizar el análisis de imagen con el ISOANA, es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Introducir la imagen en formato .png y un archivo de datos en formato .txt de la imagen irradiada que queramos analizar. El archivo de datos debe contener tres columnas en el que se proporcionen las coordenadas X e Y de cada píxel, además de todos los valores de píxel de la imagen. El valor de píxel es el valor numérico que define su intensidad en el filtro de color verde. Se utiliza este filtro ya que nos da un mayor rango de trabajo. Dicho archivo lo podemos obtener gracias a programas como ImageJ [13]. Para añadir los archivos solo se debe presionar los botones ‘Seleccionar el archivo de datos’ y ‘Seleccionar el archivo de imágenes’ y localizarlos (Imagen 19).

ISOANA (Desarrollado por Ana Mary Carrillo Padrón)	
Archivo de datos seleccionado (.txt)	<input type="button" value="Selecciona el archivo de datos"/>
Archivo de imagen seleccionado (.png)	<input type="button" value="Selecciona el archivo de imagen"/>

Imagen 19: Donde hay que añadir los archivos y casillas en lo que se observara el nombre de los archivos.

En las casillas blancas que se encuentran a los lados de dichos botones (color lila y turquesa) aparecerá la dirección de donde se encuentra el archivo y su nombre.

- El siguiente paso es introducir las variables a, b y c (Imagen 20) obtenidas en el ajuste hiperbólico de la tira sensitométrica mencionados anteriormente (Sección 2.2.2). Los parámetros serán diferentes dependiendo de la película utilizada.

a [Gy] =	-0.7
b [Gy/Vp] =	37992.1
c [Vp] =	7821.1

Imagen 20: Donde se colocan los parámetros para la tira sensitométrica.

Los valores del ajuste hiperbólico para las películas EBT3 y XR-RV3 se encuentran prefijados en la interfaz. Si en un futuro se usaran otro tipo de películas, únicamente se debería de realizar su tira sensitométrica y colocar los nuevos valores de estos parámetros.

- Para poder proseguir con el análisis, se deberá colocar el diámetro del aplicador en mm de la imagen (Imagen 21) que vallamos a analizar y el tiempo de irradiación en minutos.

Diámetro del aplicador[mm]	<input type="text"/>
Tiempo de irradiación [min]	1.0

Imagen 21: Donde se coloca el diámetro del aplicador y tiempo de irradiación.

- ISOANA para analizar las imágenes crea una gráfica PDD (dosis absorbida - profundidad) y una gráfica tasa de dosis - profundidad. Con las gráficas se observa si la radiación decae según lo esperado, exponencialmente y si el aplicador funciona correctamente. Para observar la manera en la que debería de decaer las dosis se hace un ajuste exponencial. Esta se verá mediante una línea roja en las gráficas (Imagen 22).

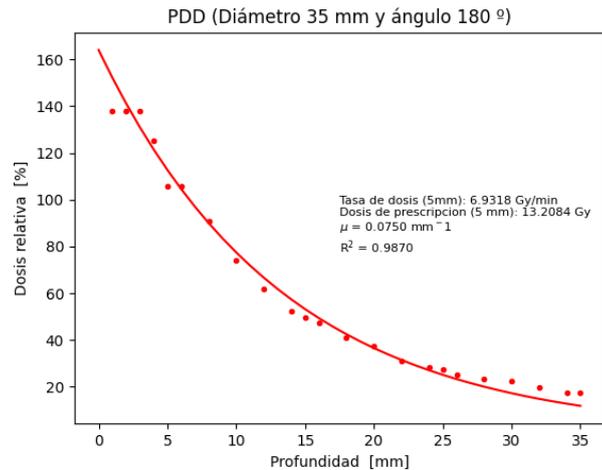


Imagen 22: Ejemplo de la gráfica PDD dadas por ISOANA.

Con las gráficas tasa de dosis -profundidad (Imagen 22) se podrá calcular aproximadamente cuanto tiempo debe estar funcionando la máquina para producir la dosis necesaria del paciente.

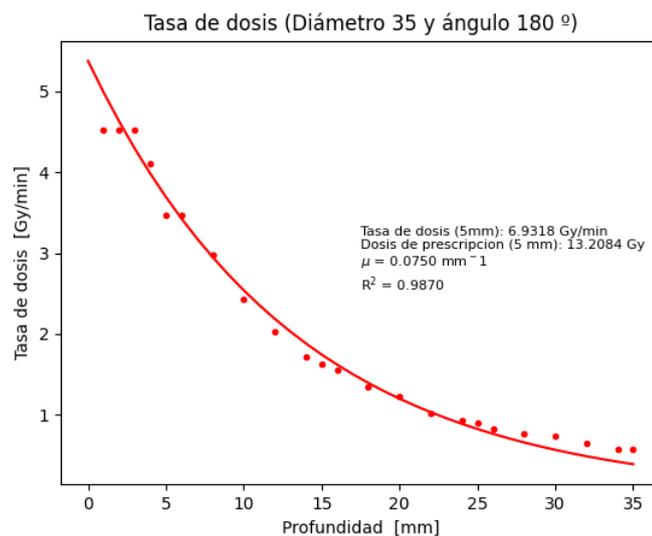


Imagen 23: Ejemplo de gráfica Tasas de dosis dada por ISOANA.

Estas graficas además nos indica la tasa de dosis y la dosis a 5 mm. En el uso clínico del equipo, la dosis de prescripción es la dosis que debe alcanzarse a 5 mm de profundidad. La μ representa el coeficiente de atenuación en un ángulo dado y la R^2 , es el coeficiente de determinación que nos indica la relación entre el ajuste y los valores reales.

Dichas gráficas, como hemos mencionados antes se forman analizando un ángulo respecto al centro del aplicador. El ángulo debe ir entre $[40^\circ, 180^\circ]$ o $[-40^\circ, -180^\circ]$ (Imagen 24). El intervalo $[-40^\circ, 40^\circ]$ es donde se encuentra el cuello del aplicador y ahí no tiene sentido medir las dosis.

Esta asignación de ángulos mencionada es debido a que los físicos hospitalarios del HUC siempre han trabajado de esta manera.

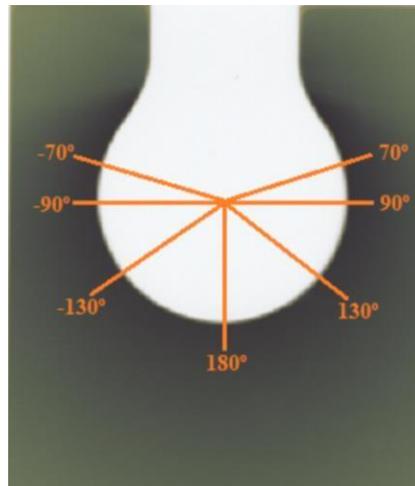


Imagen 24: Conversión de ángulos.

El ángulo se debe colocar en la casilla que indica ‘Dirección para PDD’ y ‘Tasas de Dosis’ (Imagen 25).

Dirección para PDD y Tasa de Dosis (ángulo > 40° o ángulo < -40°)	
---	--

Imagen 25: Donde se coloca el ángulo que quieres analizar.

Al presionar estos botones, ISOANA también crea un Excel para cada gráfica. Este está formado con tres columnas que nos indica las profundidades, las dosis o las tasas de dosis a esas profundidades y el valor de dosis para esas profundidades mediante el ajuste exponencial. Dicho ajuste exponencial no se realiza con todos los valores obtenidos de dosis a esas profundidades, si no que empieza a partir de una profundidad de 3mm. Esto es para corregir supuestos errores cometidos a la hora de hacer la medida, como, por ejemplo, la mala colocación de la película radiocrómica recortada para cada aplicador.

Para obtener estas graficas solo hay que rellenar los elementos mencionados anteriormente y pulsar el botón ‘PDD’ para obtener la dosis absorbida – profundidad o ‘TASAS’ para obtener las tasas de dosis – profundidad.

5. Este programa además crea un mapa de isodosis. La isodosis es una línea de puntos la cual nos indica en una imagen que pixeles tiene la misma dosis o valor. ISOANA dibujara isodosis para el 100%, 90%, 80% y 50% de la dosis respecto a la dosis promedio, así como cualquier otro porcentaje que el usuario desee seleccionar (Imagen 26).

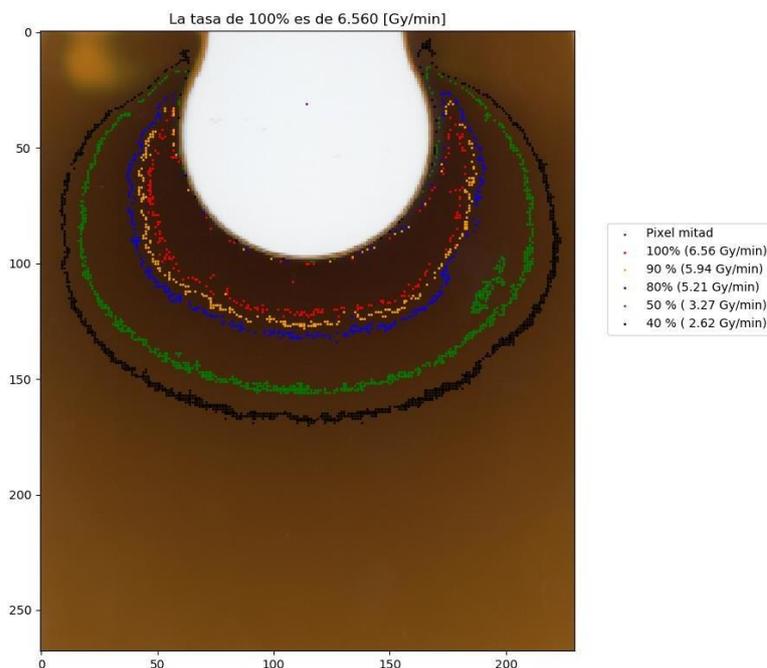


Imagen 26: Mapa de isodosis.

La dosis promedio es a la que denominamos la dosis media que se encontraría a 5 mm del aplicador. Para poder crear este mapa debemos rellenar los apartados de ‘Ancho de línea en porcentaje’, ‘Isodosis opcional’ y ‘Suavizado’. Por último, deberá apretar el botón ‘ISODOSIS’ (Imagen 27).

Ancho de línea en porcentaje (0-5)	<input type="text" value="2.0"/>	TASAS
Isodosis opcional [%]	<input type="text"/>	
Suavizado (0-4)	<input type="text" value="2.0"/>	ISODOSIS

Imagen 27: Donde se coloca el ancho de línea, la isodosis opcional y el suavizado

El ‘ancho de línea en porcentaje’ es un valor que nos hará reducir los valores analizados para formar las isodosis. En ‘isodosis opcional’ se coloca el porcentaje de dosis respecto a la dosis promedio que quieras. En el caso de que no se quiera dibujar ninguna más, se colocara una X. El ‘suavizado’ es un promedio que se hace a los valores del píxel de la imagen, ponderándolos de diferente manera dependiendo del número que escojas. En la interfaz del programa están colocadas unas instrucciones básicas de cómo funcionan.

3 **Discusión y resultados**

On the following section will show the results of the dosimetry of the spherical applicators with the two radiochromic films, using ISOANA. In addition, we will finish this section with aspects to highlight about the functionality of the program.

En esta sección, analizaremos la dosimetría de los diversos aplicadores usando ISOANA. Con ello además evaluaremos las películas radiocrómicas.

Para la evaluación de los aplicadores SP35, SP40, SP45, SP50 Y SP55 se hace uso de dos tipos de películas radiocrómicas: EBT3 y XR-RV3. Para ello estas son cortadas con el contorno de los aplicadores. Cada película radiocrómica tiene ventajas e inconvenientes. Las EBT3 resisten bien el calor del láser, pero tienen peor resistencia cuando son cortadas por procedimientos mecánicos. Las EBT3, cortadas a tijera sufren una degradación visible de sus propiedades en la zona del corte, quedando inútil la película hasta 1 o 2 mm de distancia del mismo. Las XR-RV3, sin embargo, no se dañan al ser cortadas mecánicamente, pero si al ser cortadas con láser (Imagen 28). Durante el proceso de obtención de las imágenes irradiadas, diversas laminas mostraban manchas.

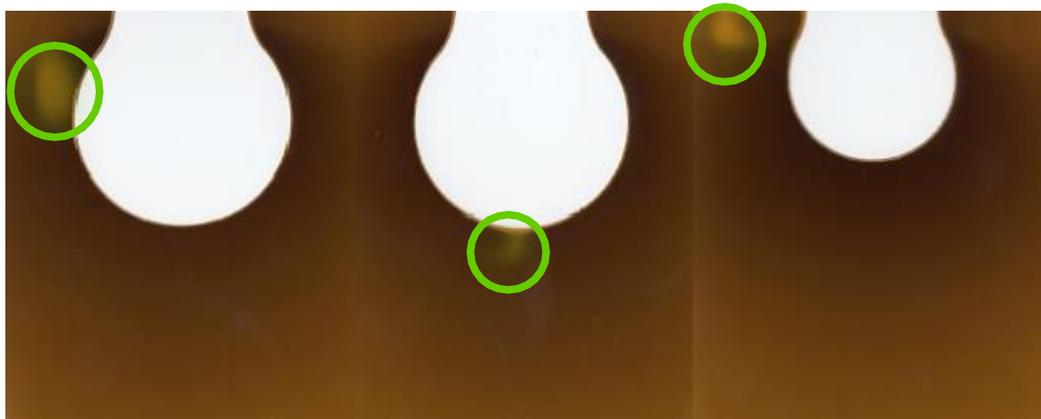


Imagen 28: Imágenes irradiadas con aplicadores de 45 y 35 mm donde se puede observar las manchas.

A la hora de analizar las imágenes con ISOANA, se observó de forma generalizada que el ajuste exponencial de la curva de dosis en profundidad funciona mejor para ángulos centrales en torno a 180° y bastante mal cerca del aplicador (Imagen 29).

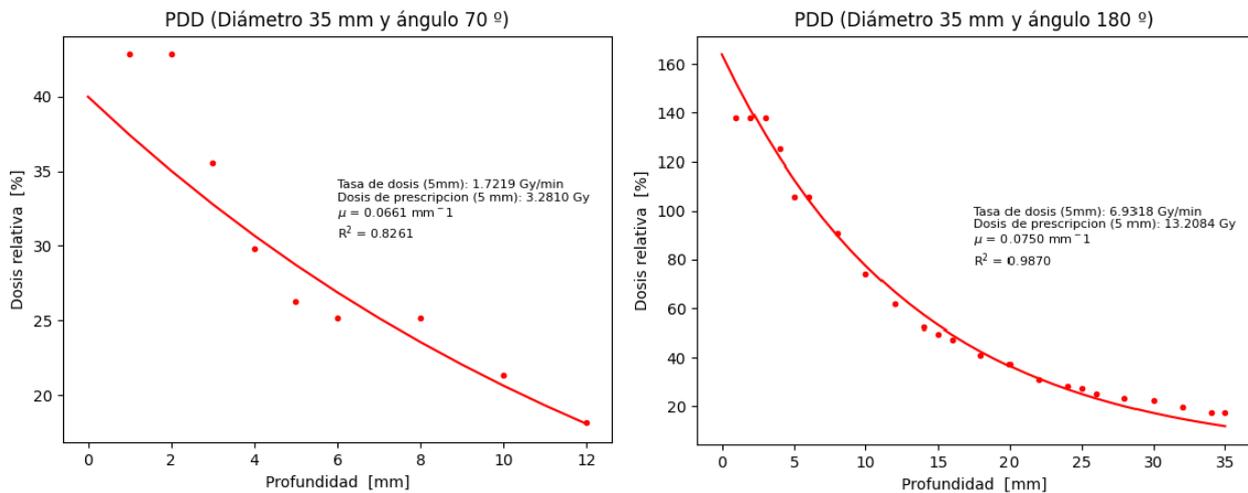


Imagen 29: a) Graficas PDD para SP35 a ángulos de 70°. b) Para 180°

Para analizar la dosimetría de los aplicadores de la IORT-50 se obtienen varias PDD a diversos ángulos. Al realizar el ajuste exponencial en ángulos opuestos se observan valores de los parámetros ligeramente diferentes (en torno al 10 %), en especial para ángulos próximos al cuello del aplicador (Imagen 30). Las diferencias son achacables a pequeñas imprecisiones en la colocación de las películas y a las incertidumbres de la calibración y la medida.

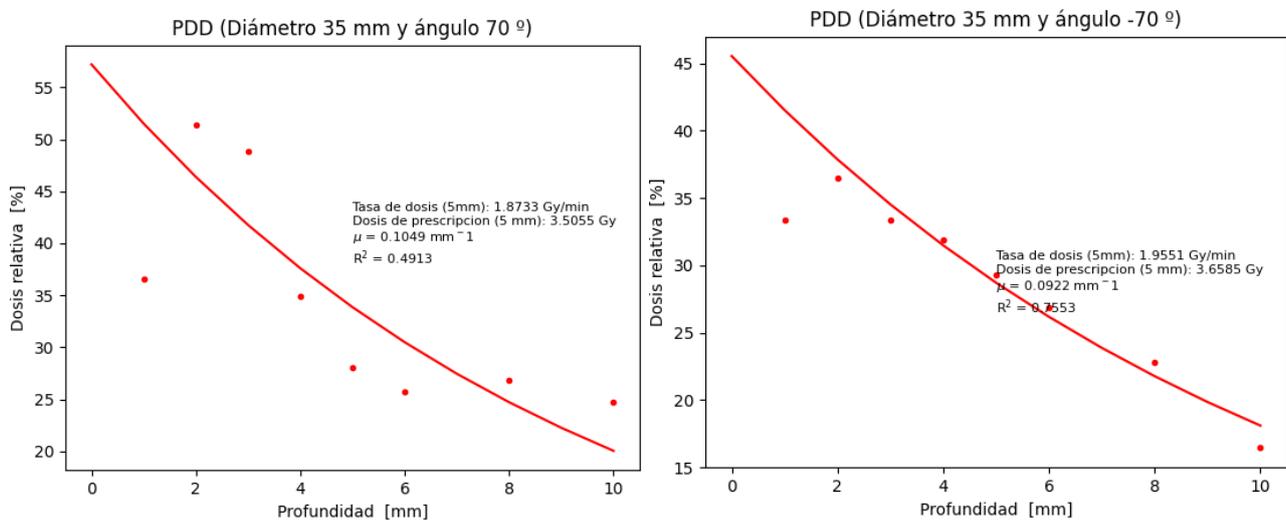


Imagen 30: a) PDD para SP35 a ángulos de 70°. b) Para -70°.

Sin embargo, debido a posibles imprecisiones en las medidas o el estado de las películas, el ajuste exponencial se hizo mediante los valores obtenidos a partir de 3 mm de profundidad.

XR-RV3

En este apartado analizaremos las películas XR-RV3 del aplicador de aluminio y PVC, cortadas a laser, con la ayuda de unas tablas que se encontraran en la sección *Anexos apartado 5.4 (Tabla de datos)*. Al principio de estas se indica el nombre del aplicador usado. Luego están las dosis a 5 mm de cada ángulo analizado, la diferencia de dosis de los ángulos opuestos y la diferencia relativa de dosis a 5 mm en porcentaje. A la izquierda de la tabla se indicará cuantas laminas se han analizado para este aplicador mediante números enteros (Imagen 31).

		SP40			
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	8,57	7,77	0,8	9
	2º	7,72	6,85	0,87	11

Imagen 31: Ejemplo de las tablas analizadas.

Los recuadros que indican el número de láminas analizadas se colorearan de un amarillo más intenso si se han visto daños en ellas.

Debido a las tablas se puede deducir que las dosis a 5mm, para un mismo aplicador y un ángulo específico, varia en torno a un 30% en el peor de los casos y sin tener en cuenta las láminas dañadas.

Además de analizar las dosis, evaluamos mediante las gráficas los coeficientes de determinación, la mayoría son números bastantes cercanos al uno, pero en algunas ocasiones se reflejan número bastantes pequeños.

EBT3

En este apartado analizaremos las películas XR-RV3 del aplicador de aluminio y PVC. Para analizar los aplicadores usaremos una tabla como la descrita en el apartado anterior. Para esta película pudimos analizar laminas cortadas a laser y a mano.

Cortadas a laser

Para esta película la mayoría de los coeficientes de determinación son cercanos a uno.

La dosis a 5 mm para cada aplicador, en ángulos opuestos, muestran una gran similitud, lo que resulta en la mayoría de los casos una dosis relativa inferior al 10%. Estas dosis a 5 mm presentan una variación mínima entre los diferentes aplicadores y ángulos alejados del cuello del aplicador.

Cortadas a mano

Para esta película cortada a mano no todos los coeficientes de determinación son cercanos a uno.

La mayoría de las dosis a 5 mm para cada aplicador, entre los ángulos opuestos tiene gran similitud. Como indicamos en la anterior tabla estas dosis no varían mucho entre los aplicadores y ángulos alejados del cuello del aplicador.

3.1 Funcionalidad del programa

ISOANA realiza todas las funciones requeridas: representa gráficamente las curvas de dosis y tasa de dosis en profundidad para cualquier dirección solicitada, extrae los coeficientes de atenuación efectiva en cada ángulo y representa las curvas de isodosis sobre las imágenes escaneadas. El programa tarda alrededor de 10 segundos en realizar las gráficas, y 20 minutos en realizar el mapa de isodosis. El programa realiza cientos de miles de operaciones, pero la incertidumbre de cálculo se mantiene siempre inferior a la incertidumbre debida a la medida del valor de píxel en el escaneo de las películas, así como a la incertidumbre del proceso de calibración. Debido al alto número de operaciones, el programa tarda de diez a veinte minutos en realizar un análisis completo de cada imagen. Queda pues pendiente la optimización del código para aumentar su velocidad de ejecución. En revisiones posteriores se intentará mejorar esta característica del software.

4 Conclusiones

Las imágenes de la película EBT3 analizadas anteriormente fueron obtenidas en 2019, mientras que las de la película XR-RV3, son de 2023. Esta diferencia se debe a varios contratiempos experimentados durante el proceso de obtener las imágenes.

En el caso de las películas XR-RV3 solo se analizaron imágenes cortadas a laser debido a restricciones de tiempo. Además, debido a un problema de software de la ioRT-50 para detectar los aplicadores de PVC, solo se utilizó los aplicadores de aluminio y PVC

La película de EBT3 demostraron una mayor resistencia al corte laser, sin presentar degradación alguna. En términos del coeficiente de determinación, las películas EBT3 son más constantes y cercanas a 1 que las XR-RV3. Las dosis a 5 mm también se mantuvo más constante en la película EBT3, aunque esta consistencia fue más evidente en ángulos alejados del cuello del aplicador. Este último razonamiento es independiente del tiempo de película utilizada.

Se calculó la diferencia de la dosis a 5mm de los ángulos opuestos para ambas películas. La incertidumbre entre las medidas no suele ser mayor de un 10% por lo que se puede suponer que es debido al error de medidas. En algunos casos se observó un aumento de incertidumbre más significativo. En las películas cortadas a mano, este incremento podría atribuirse al proceso de corte manual. Por otro lado, en las películas cortadas a laser, se observó un aumento de la incertidumbre en los ángulos más cercanos al aplicador.

En conclusión, el análisis de las películas EBT3 y XR-RV3 reveló que las imágenes de EBT3 son más resistentes al corte láser y muestran una mayor consistencia en los coeficientes de determinación y las dosis a 5 mm. Por otro lado, se observó una mayor incertidumbre en algunas películas cortadas a mano y un aumento en el ángulo más cercano al aplicador en las películas cortadas con láser. Esto destaca la importancia de la técnica de corte y el ángulo a analizar.

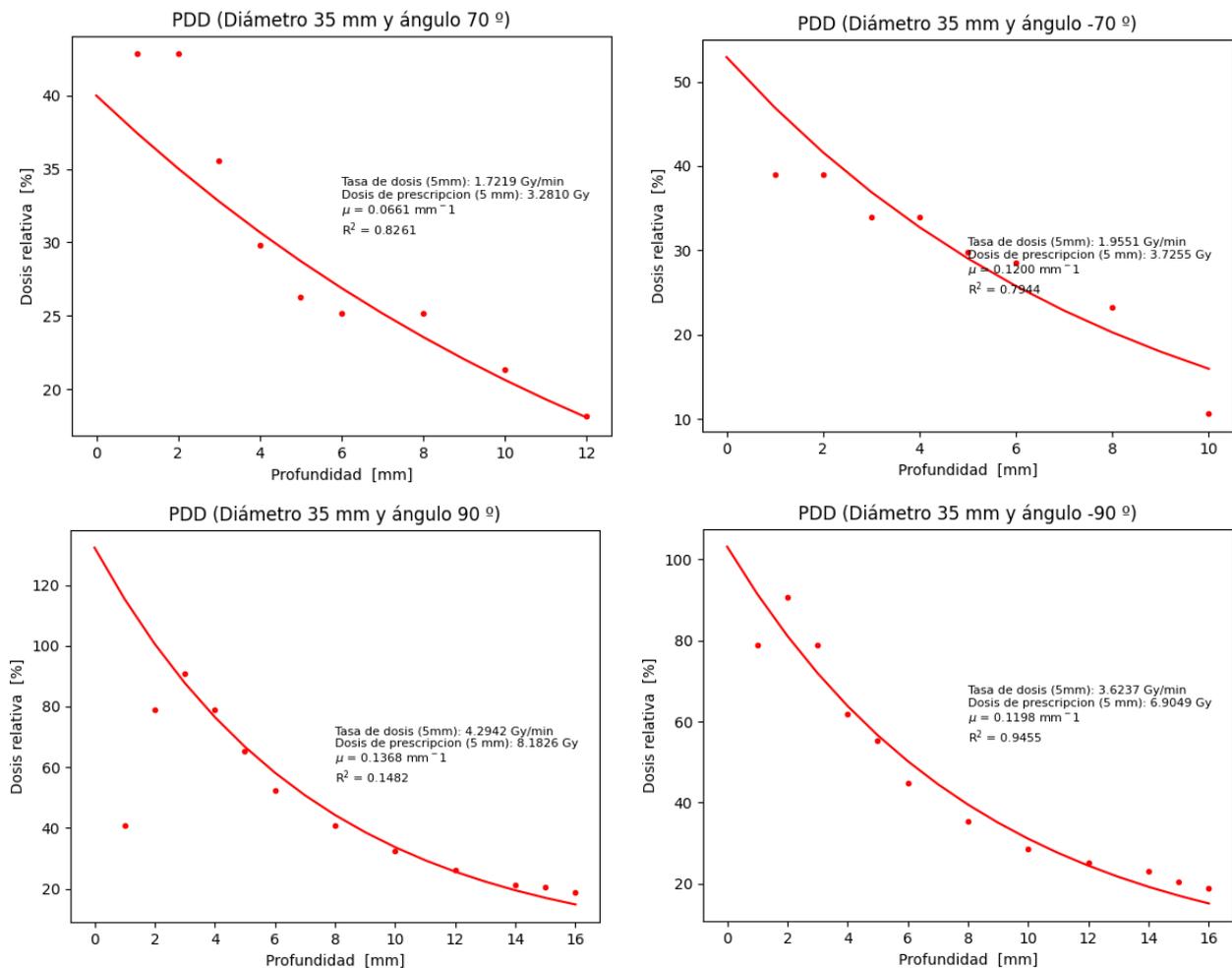
5 Anexos

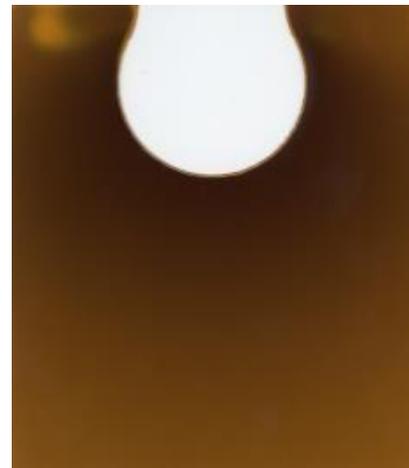
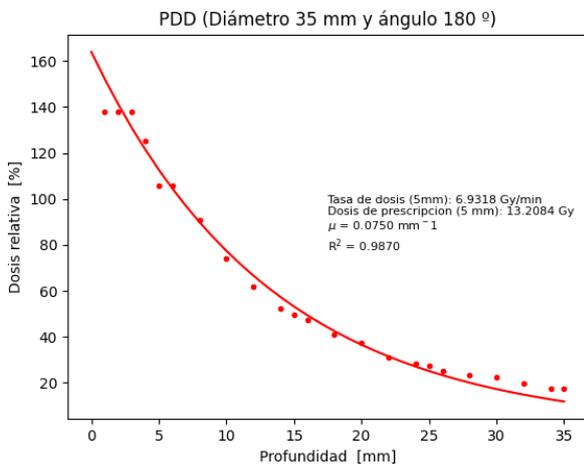
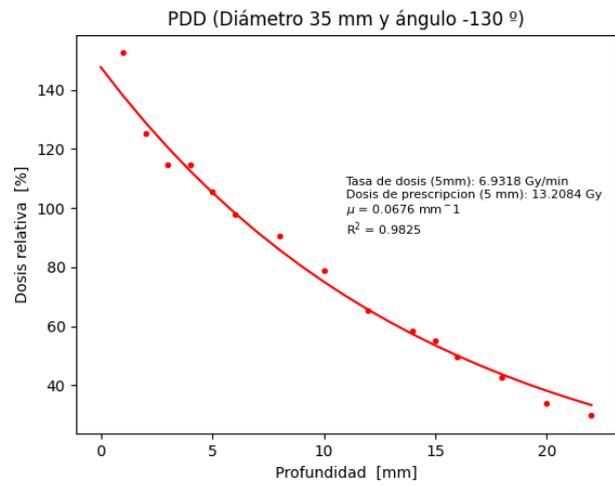
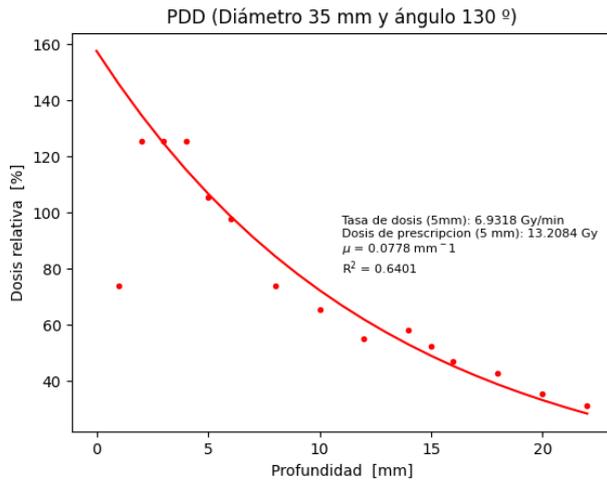
In this section, we will include the PDD of each applicator corresponding to the different films that we analyze in order to obtain the previously mentioned results. In addition, the irradiated film with which the graphics are obtained will be included.

5.1 Películas XR-RV3

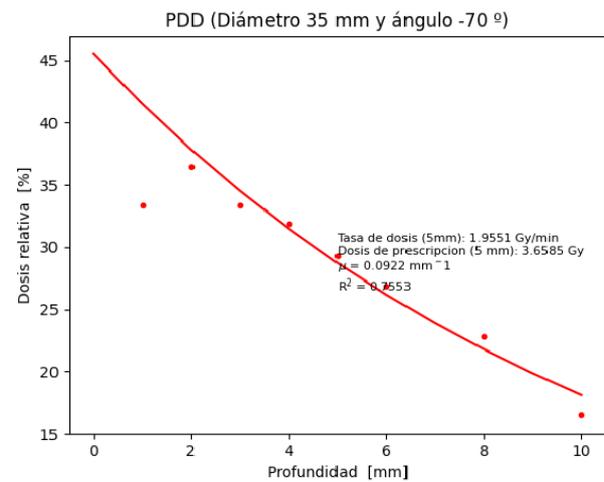
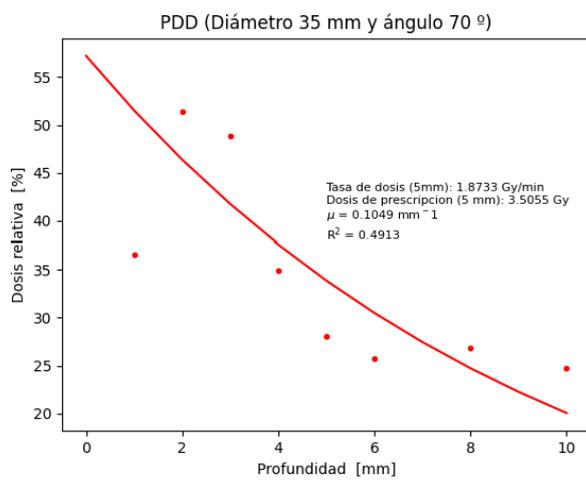
En este apartado se colocarán todas las gráficas obtenidas con la película XR-RV3 cortada con láser y los aplicadores de aluminio y PVC. Para cada aplicador se hicieron varias películas irradiadas, las cuales identificarán mediante un número al final del título de los siguientes apartados.

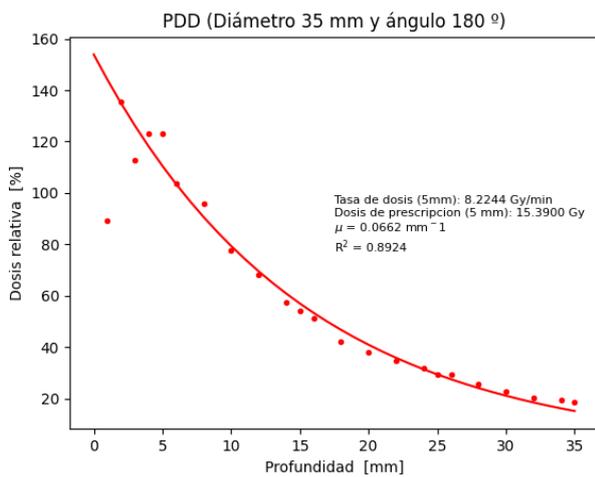
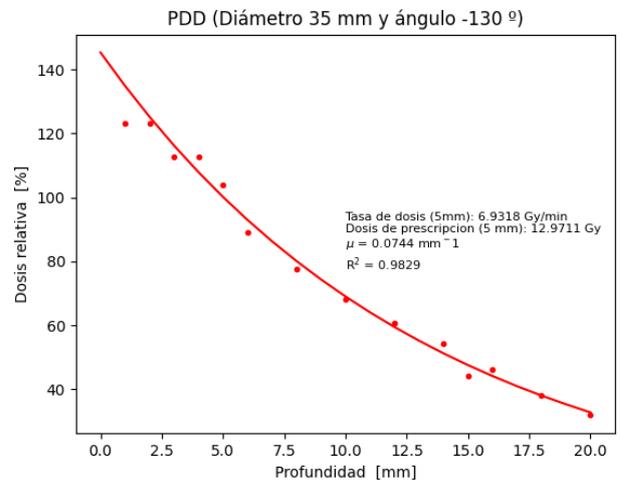
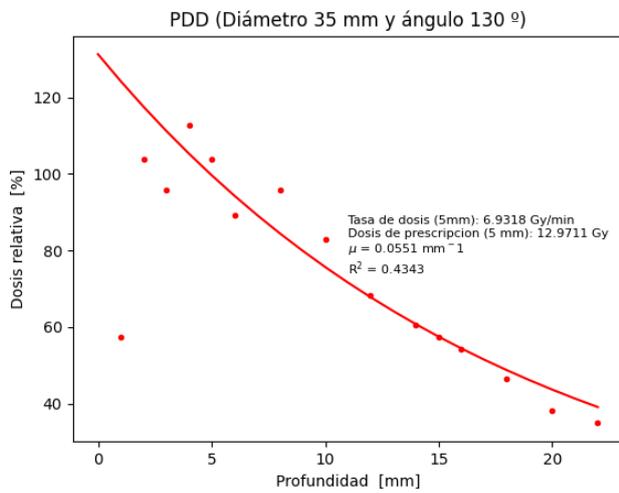
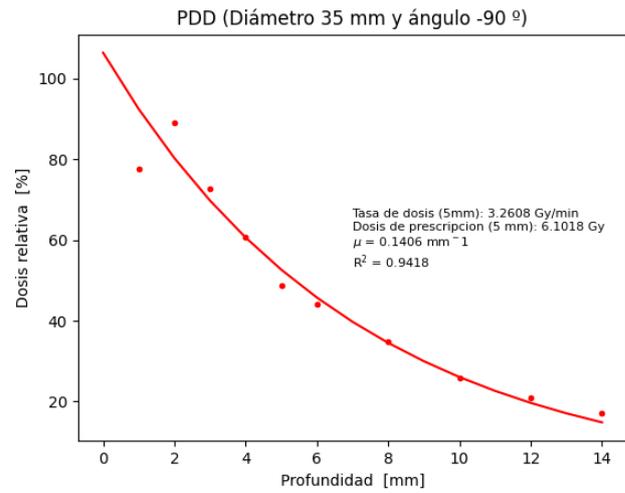
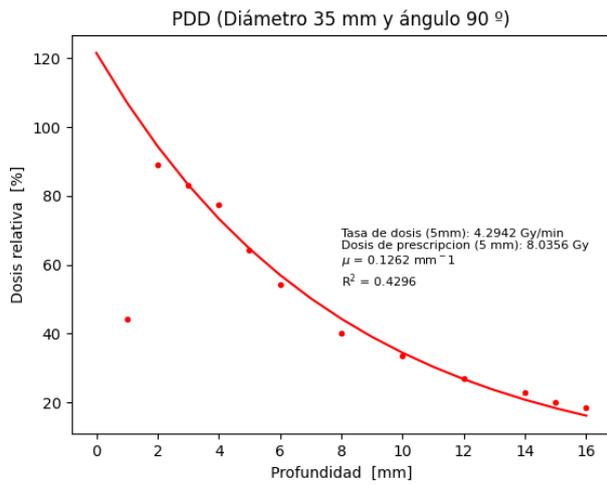
PDD SP35_1



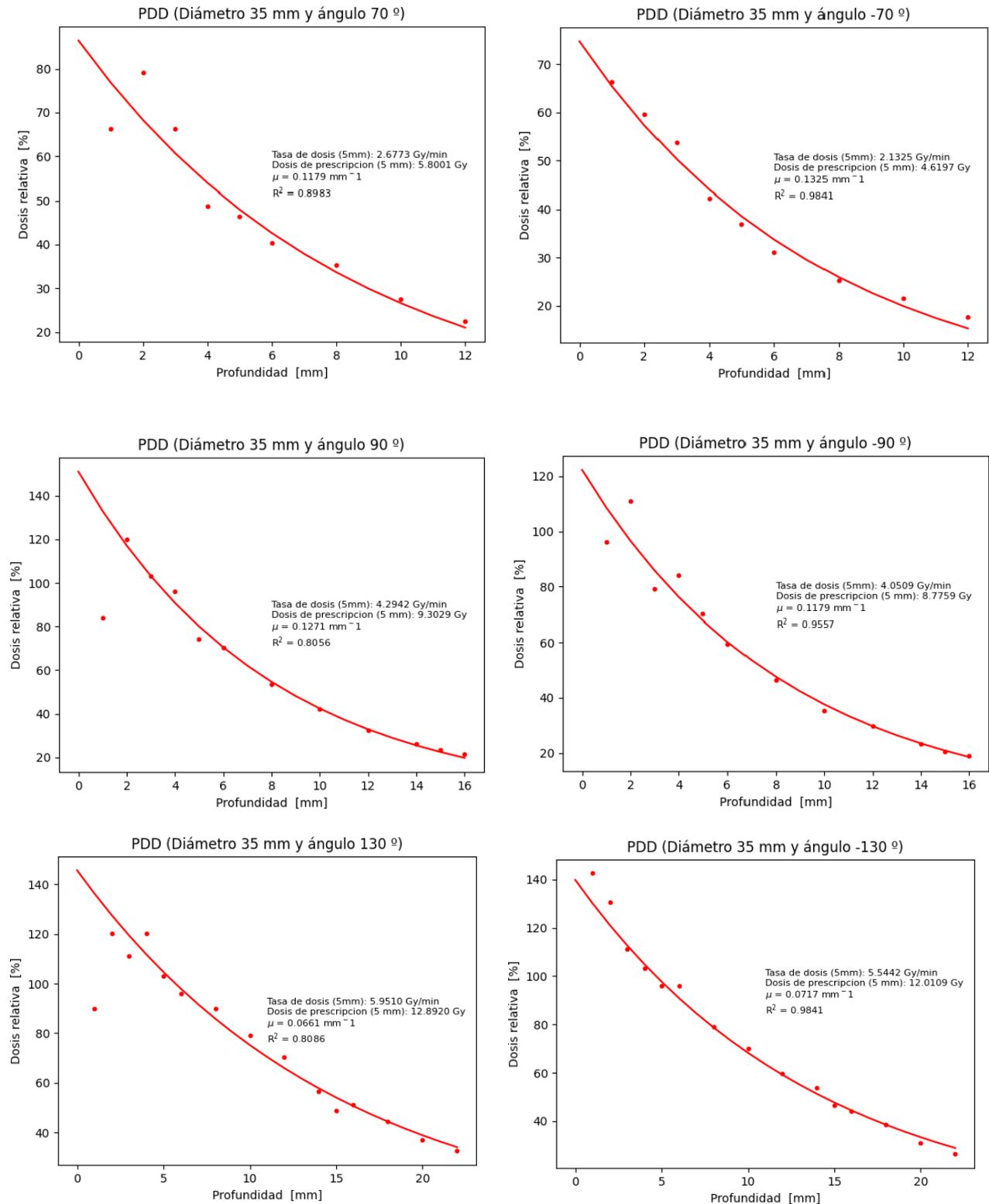


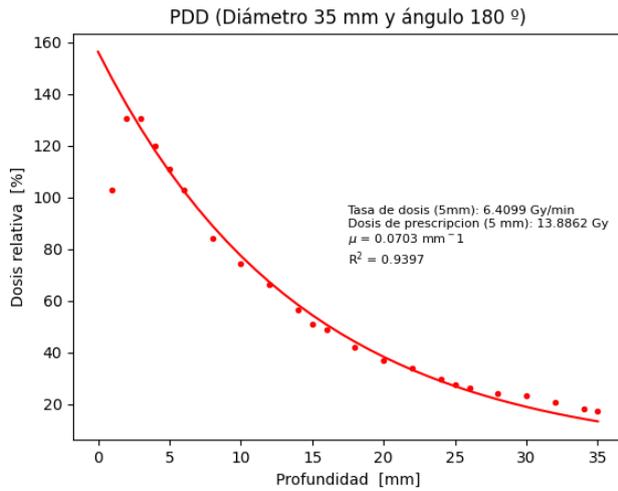
PDD SP35_2



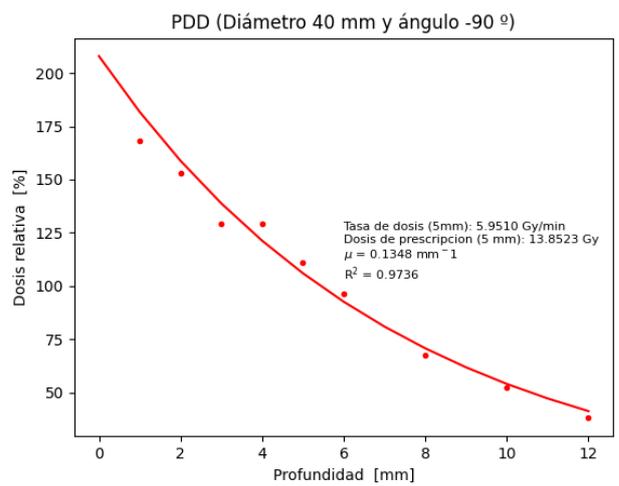
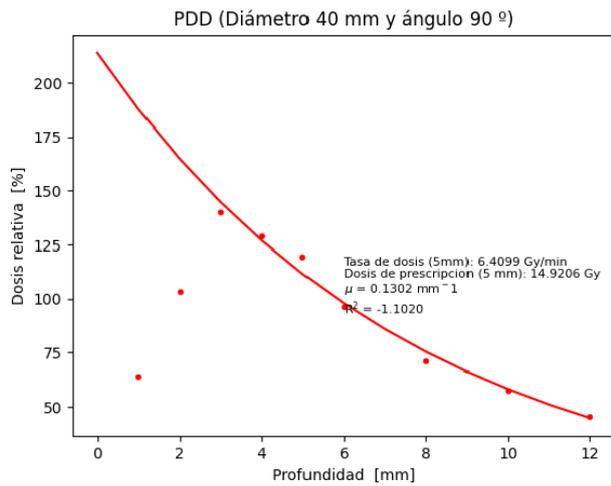
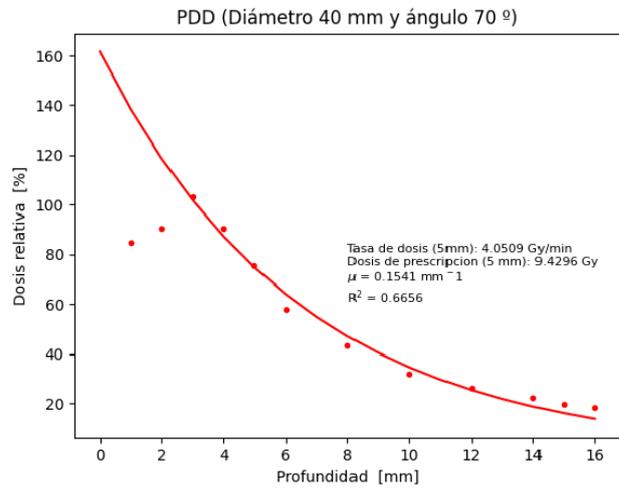
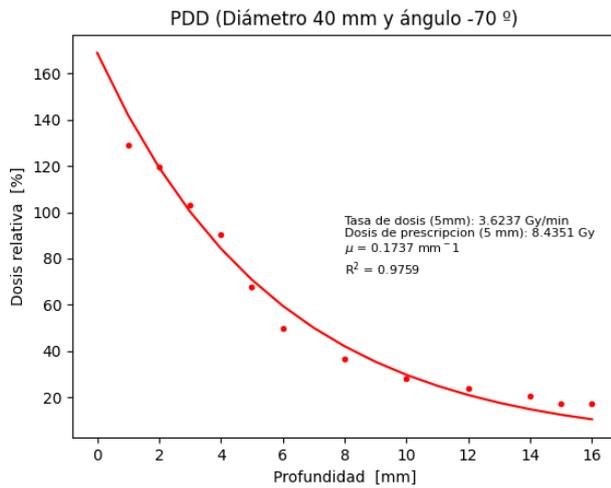


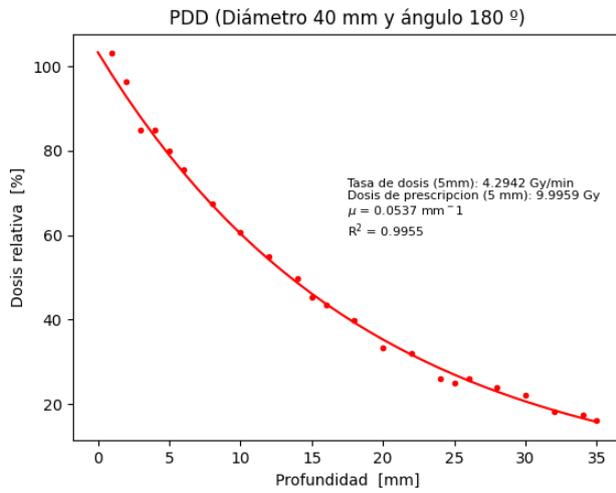
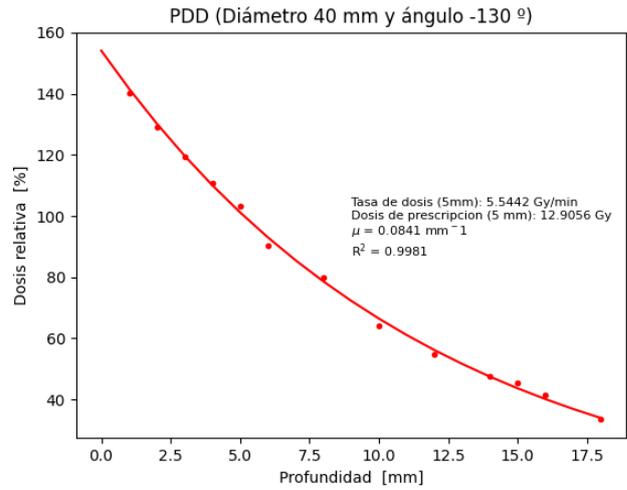
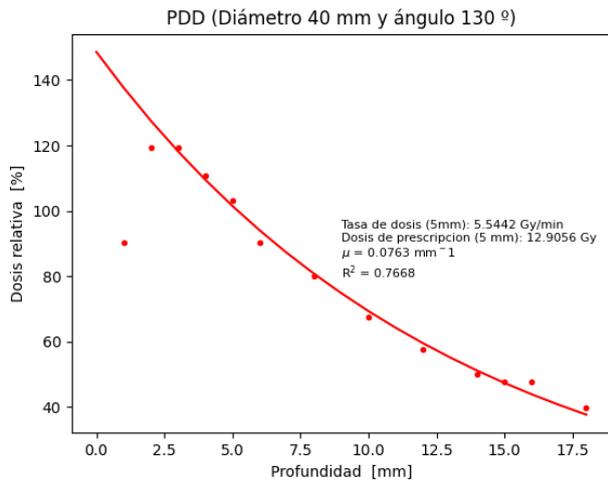
PDD SP35_3



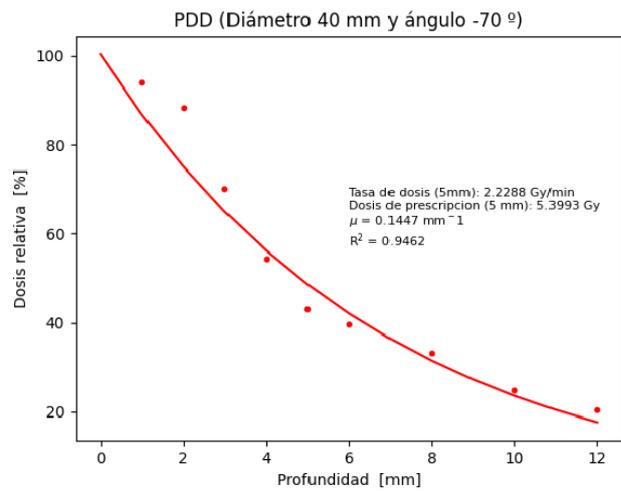
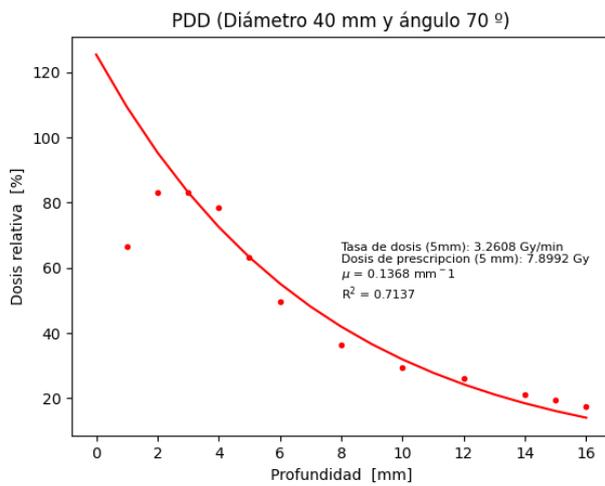


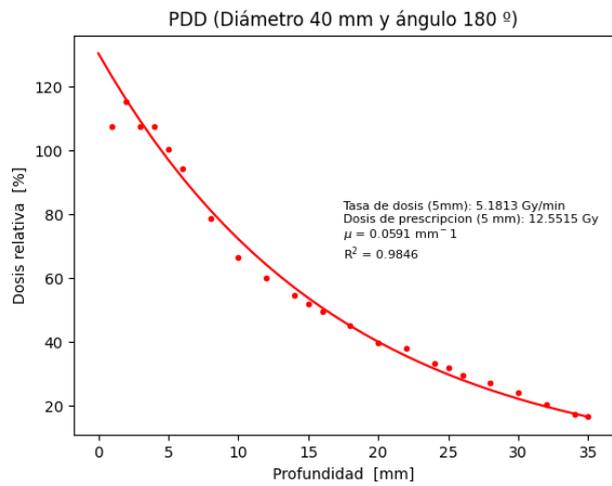
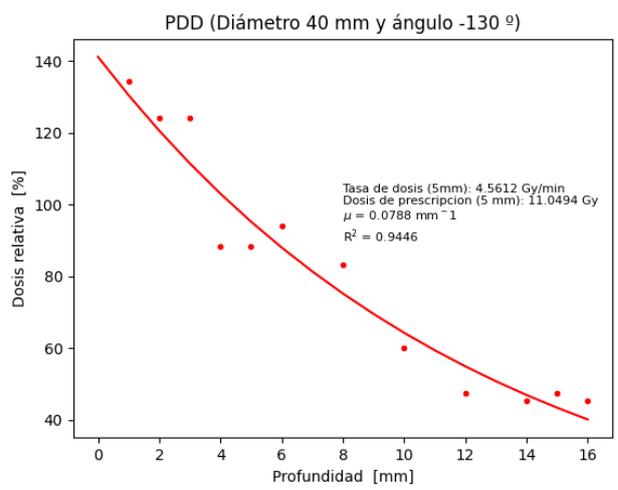
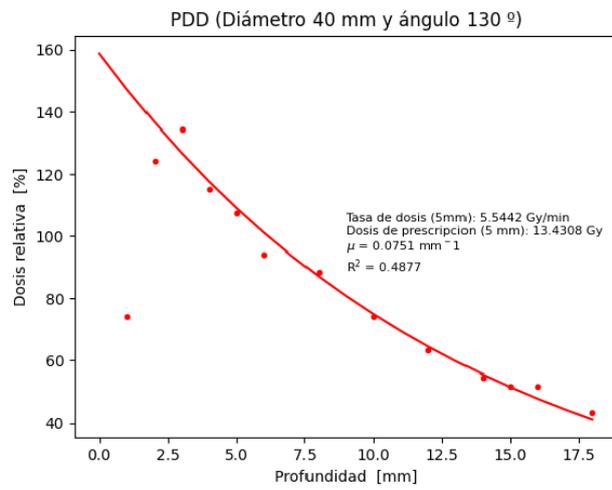
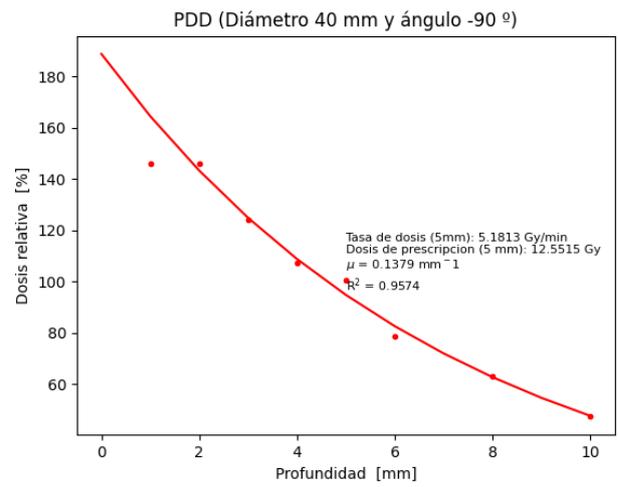
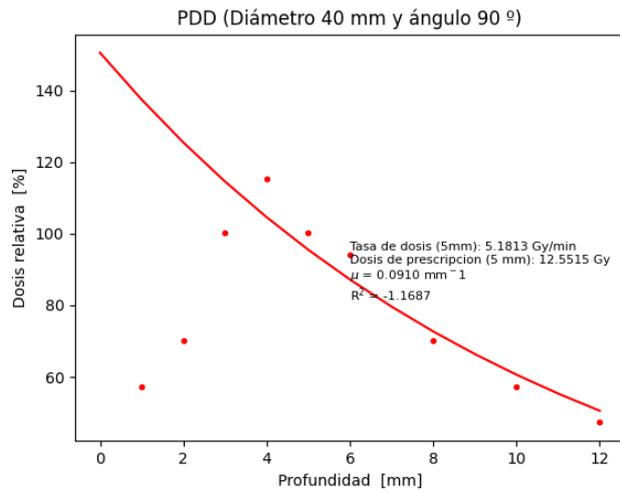
PDD SP40_1



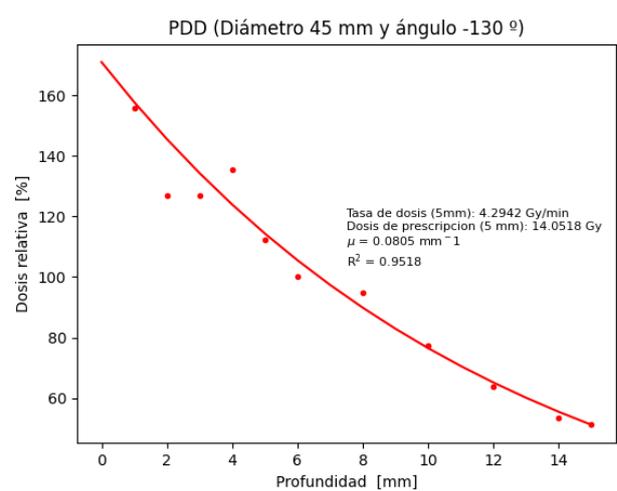
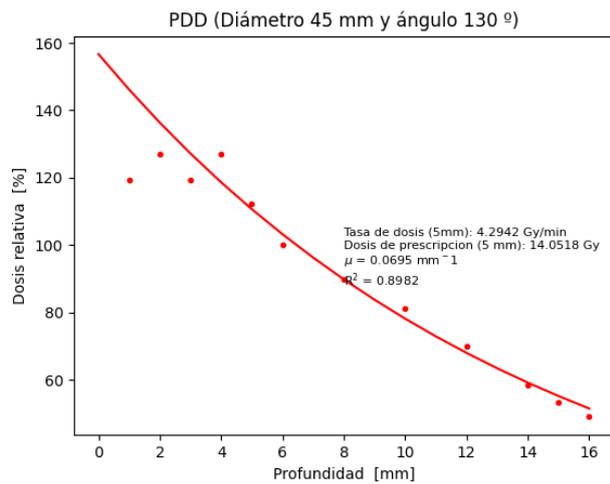
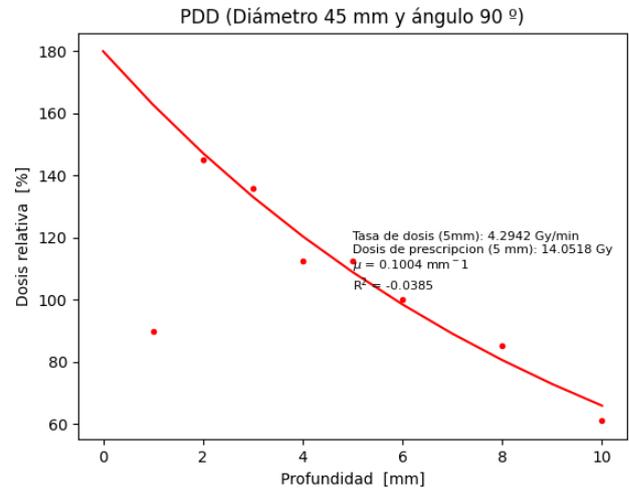
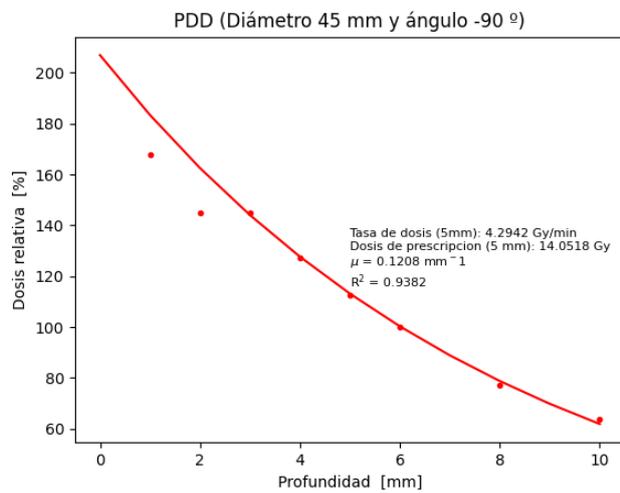
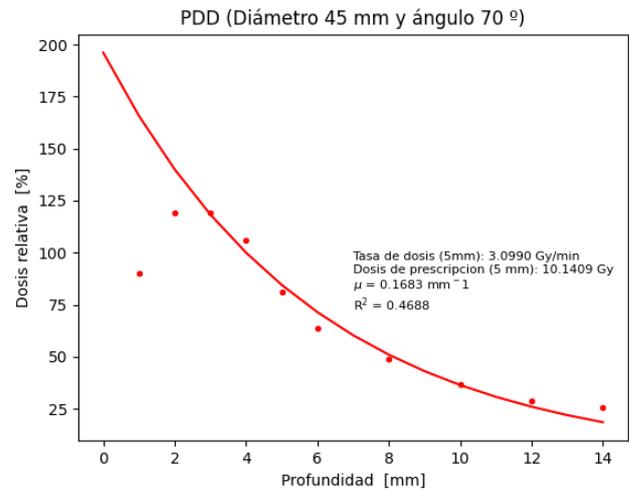
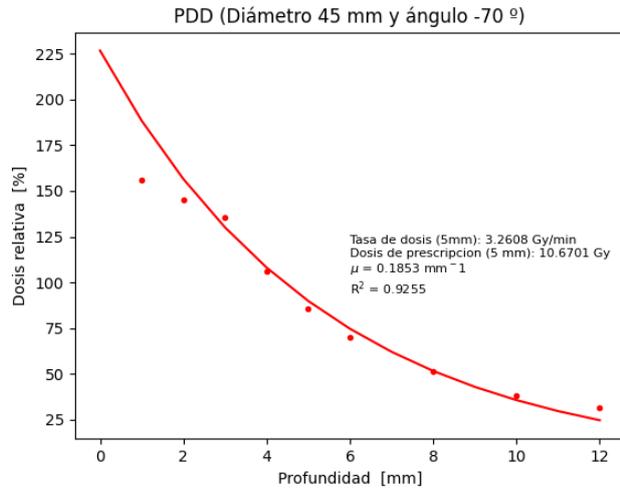


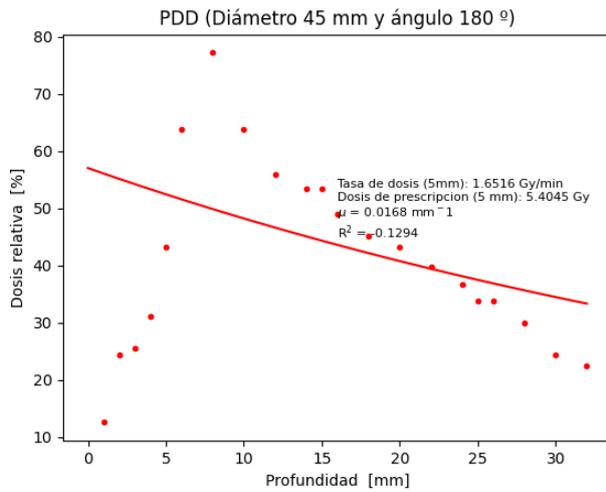
PDD SP40_2



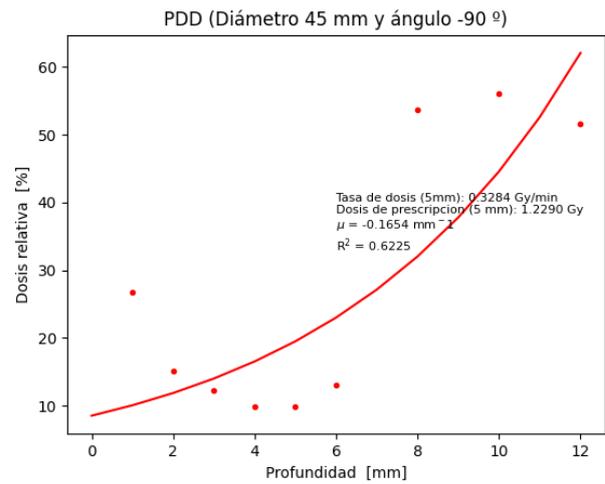
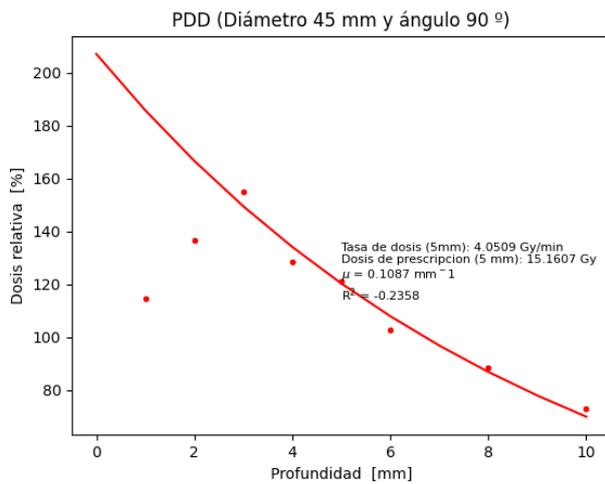
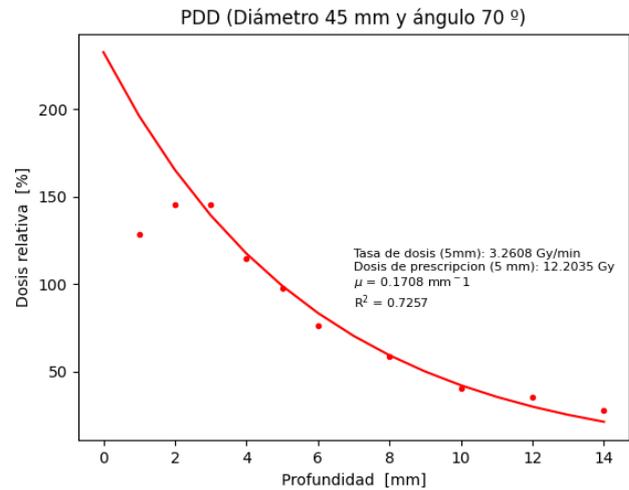
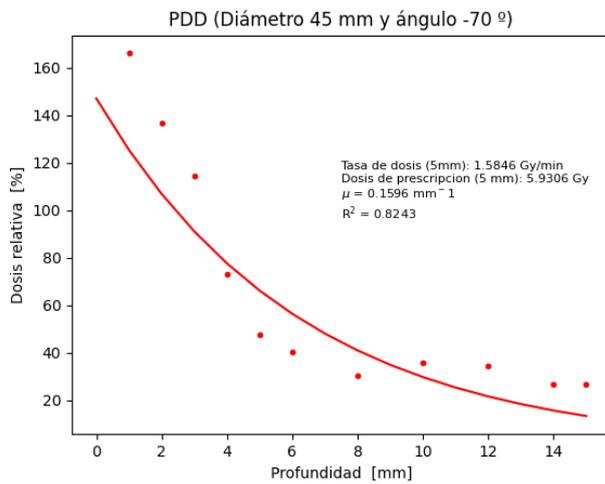


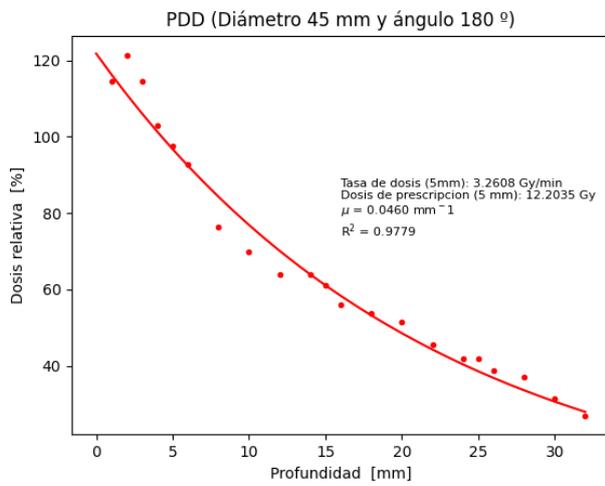
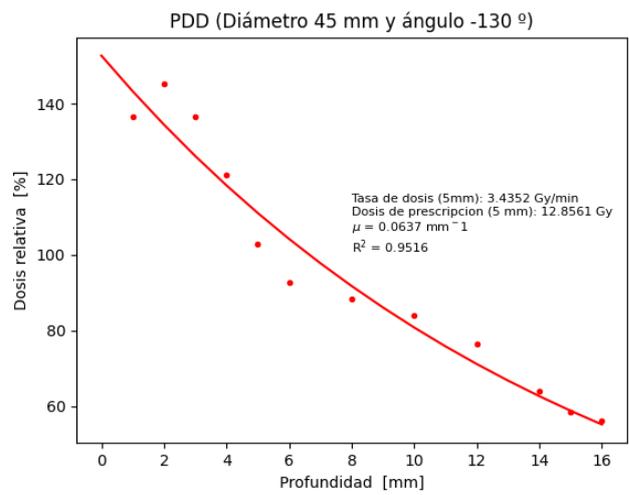
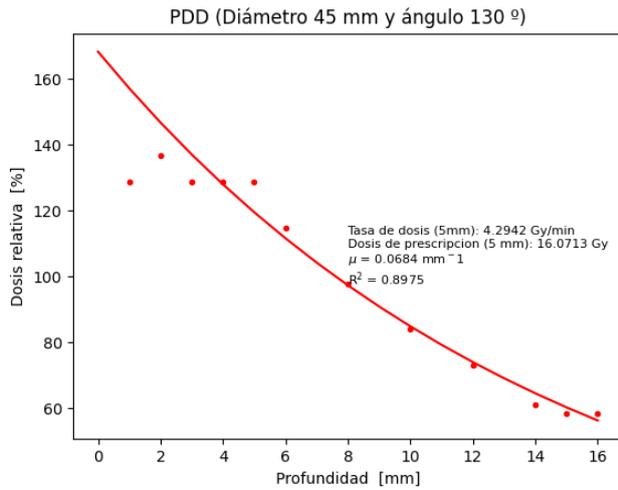
PDD SP45_1



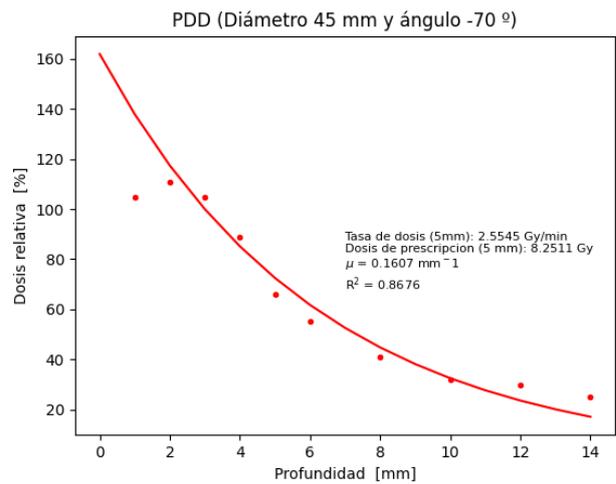
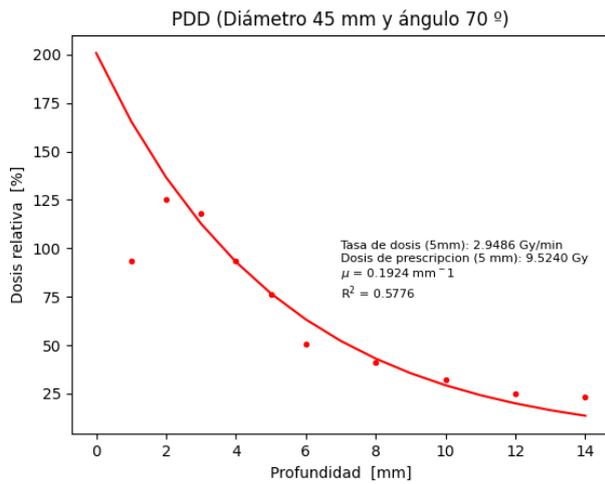


PDD SP45_2

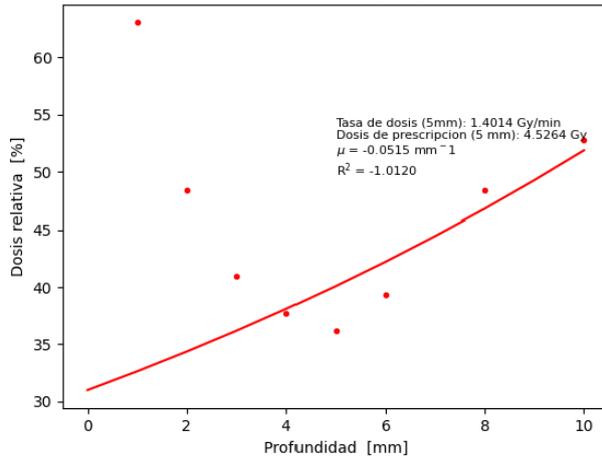




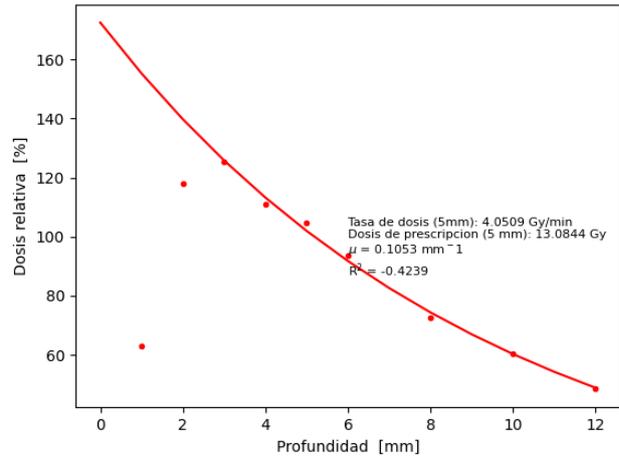
PDD SP45_3



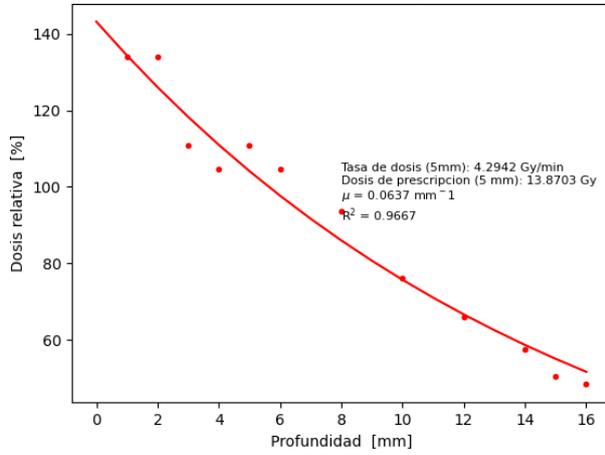
PDD (Diámetro 45 mm y ángulo -90 °)



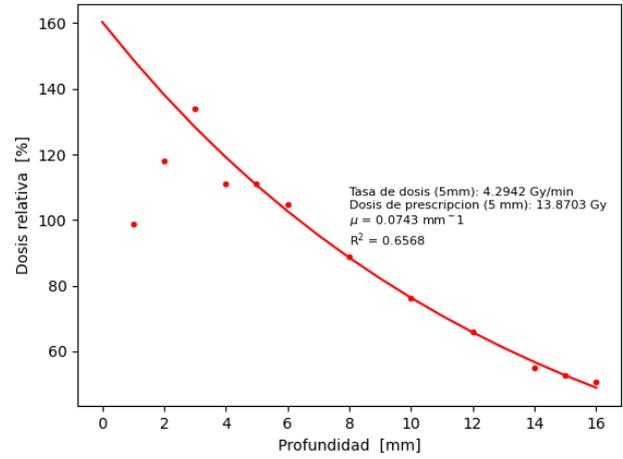
PDD (Diámetro 45 mm y ángulo 90 °)



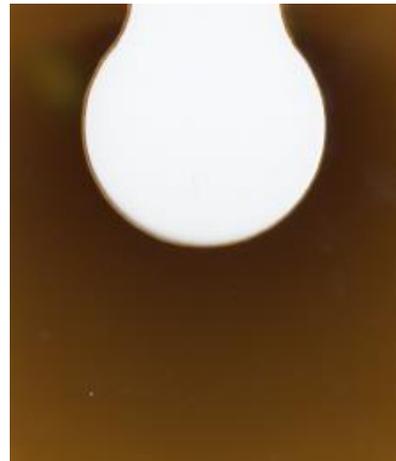
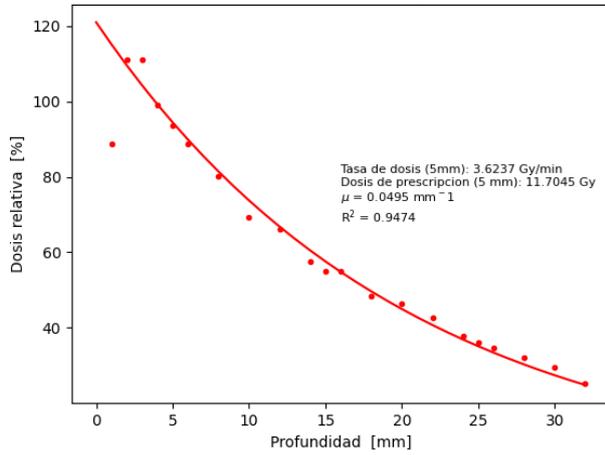
PDD (Diámetro 45 mm y ángulo -130 °)



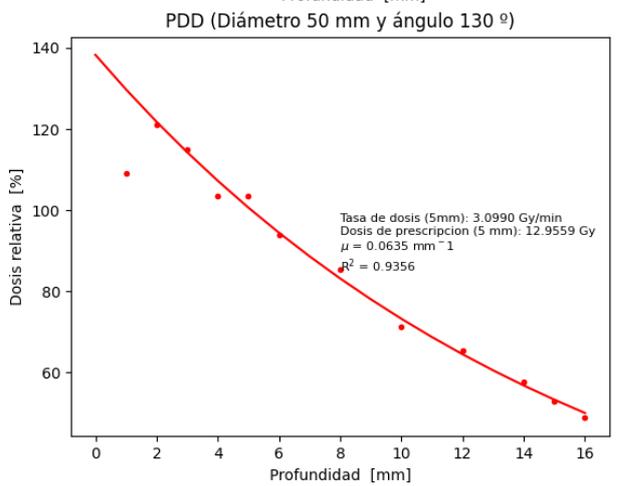
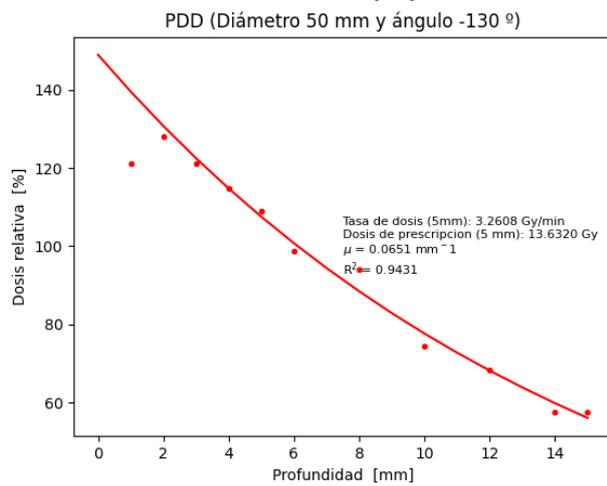
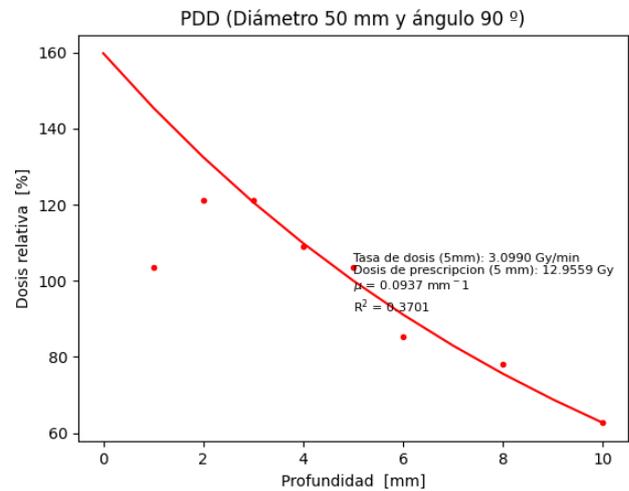
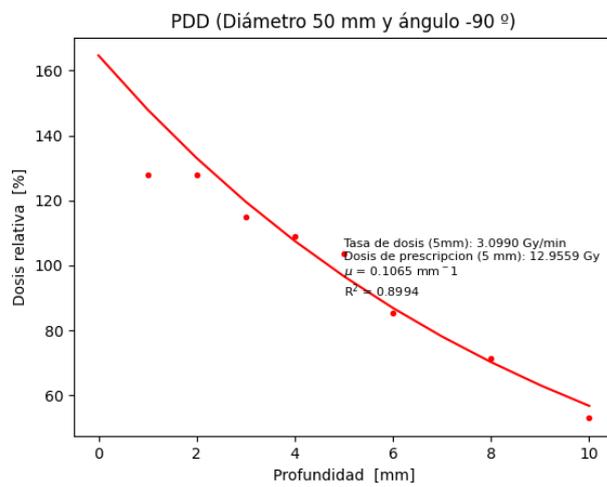
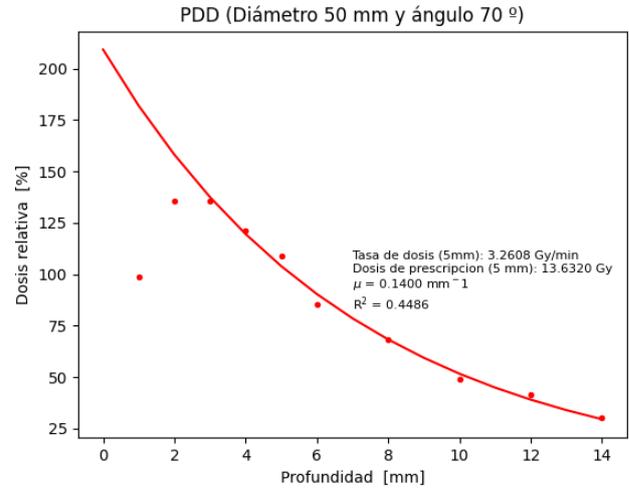
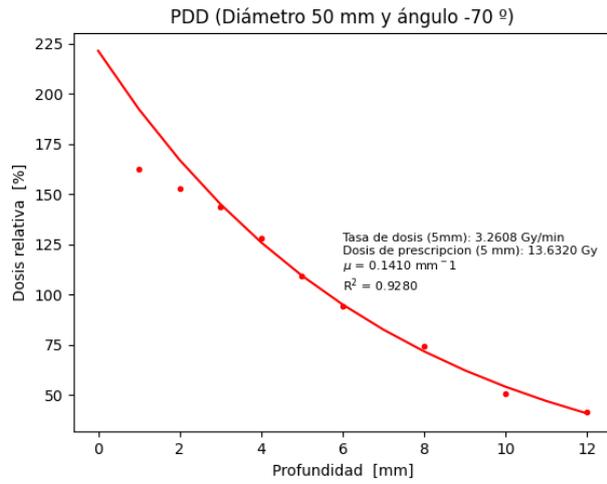
PDD (Diámetro 45 mm y ángulo 130 °)



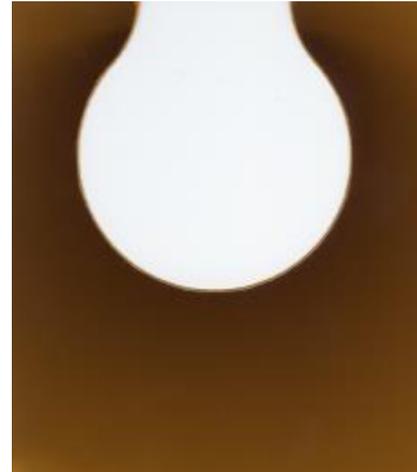
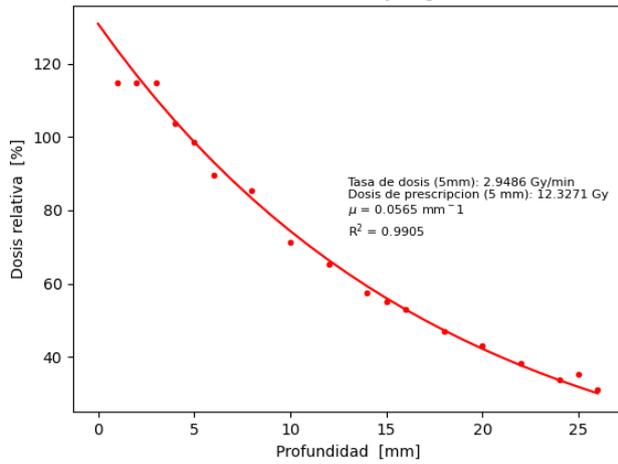
PDD (Diámetro 45 mm y ángulo 180 °)



PDD SP50_1

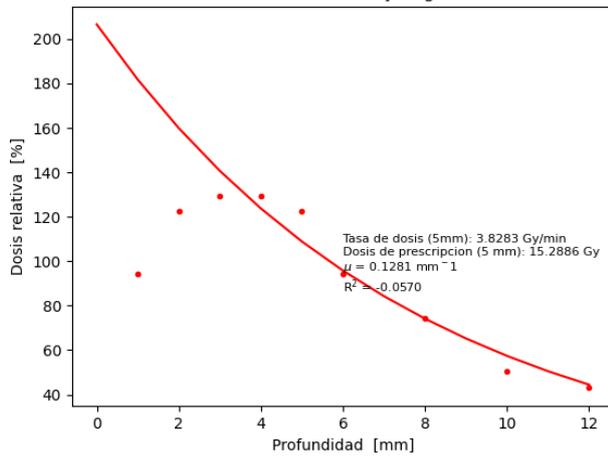


PDD (Diámetro 50 mm y ángulo 180 °)

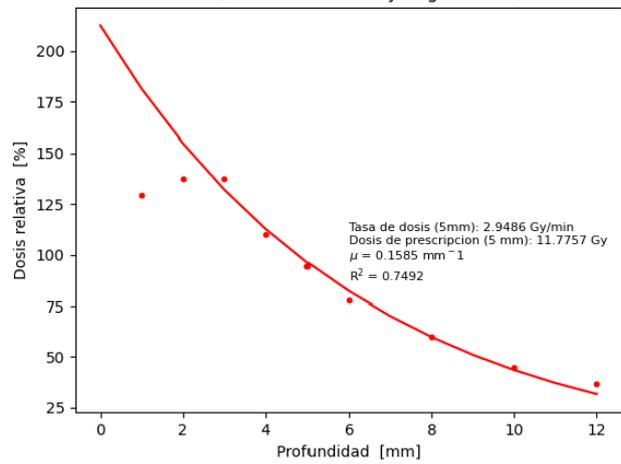


PDD SP50_2

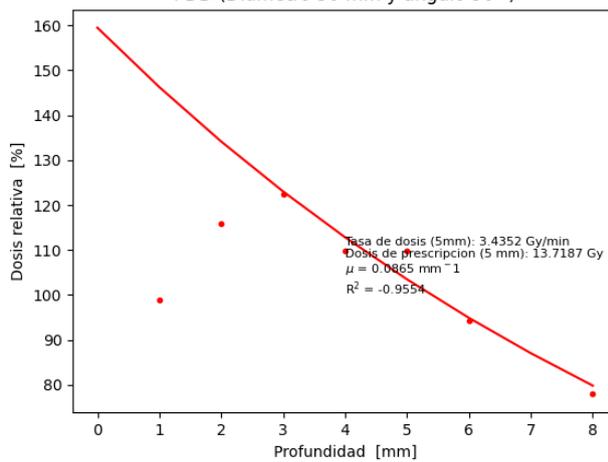
PDD (Diámetro 50 mm y ángulo 70 °)



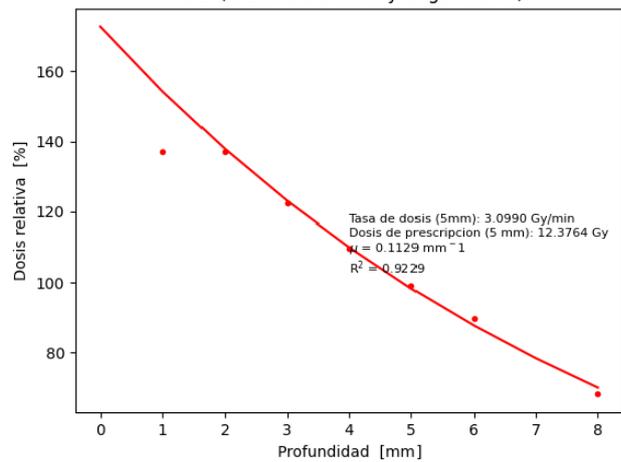
PDD (Diámetro 50 mm y ángulo -70 °)

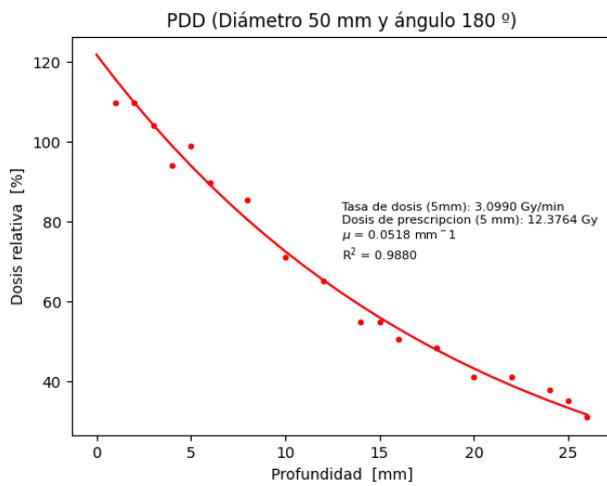
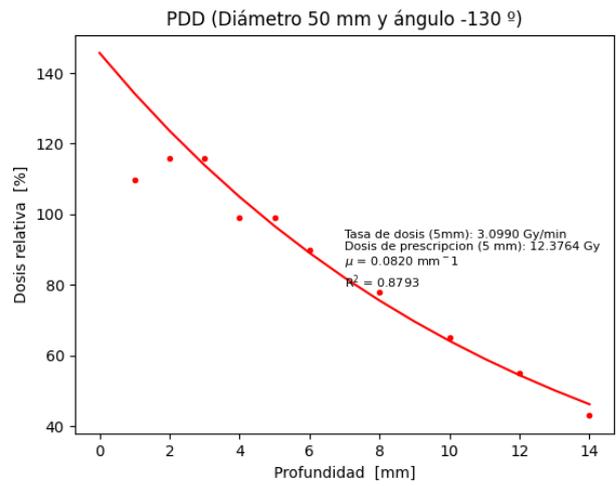
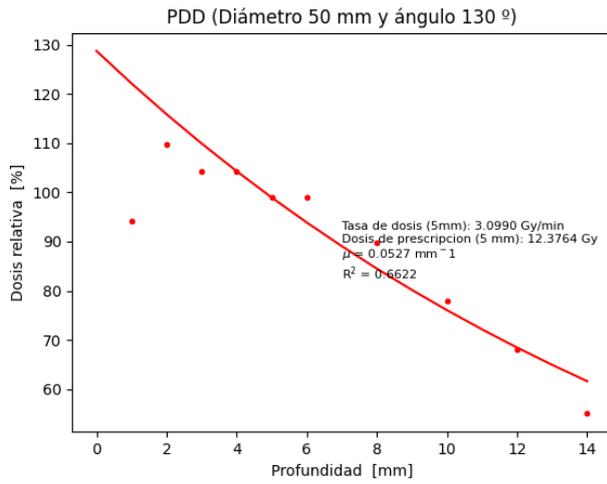


PDD (Diámetro 50 mm y ángulo 90 °)

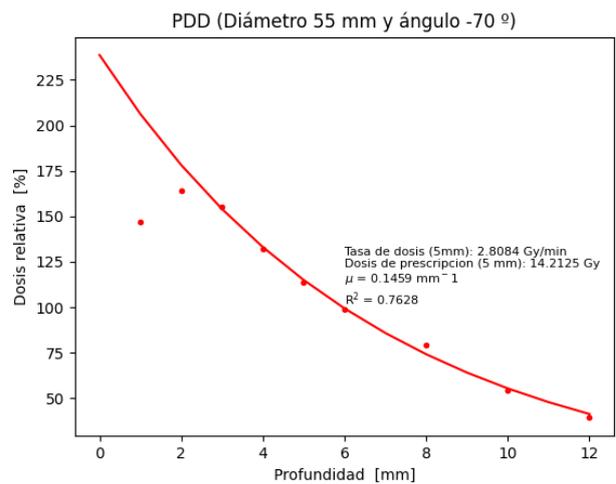
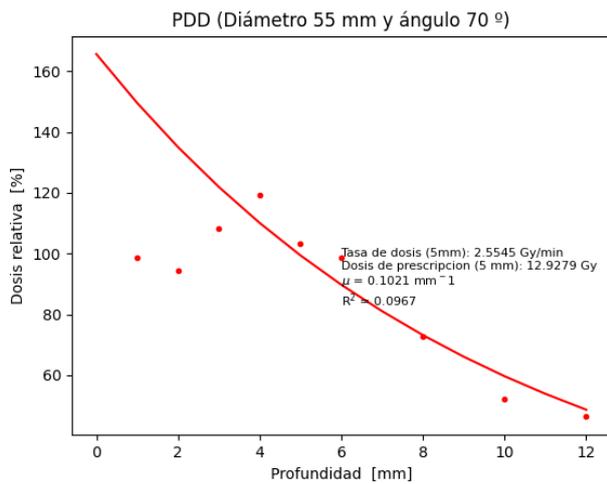


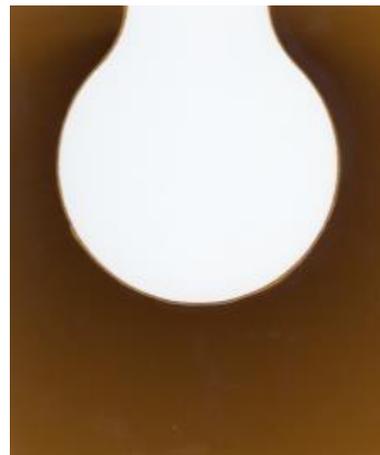
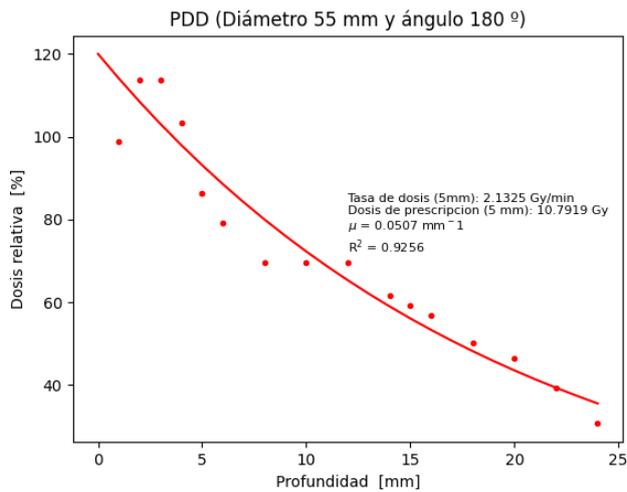
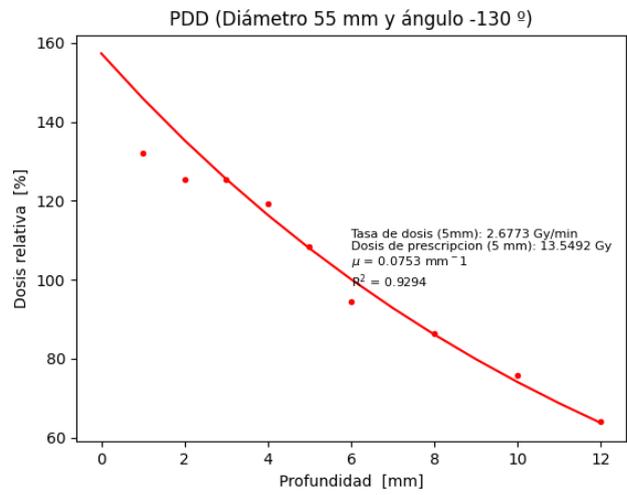
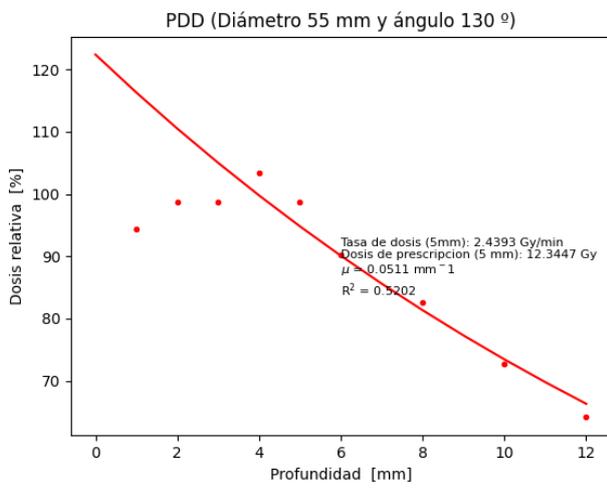
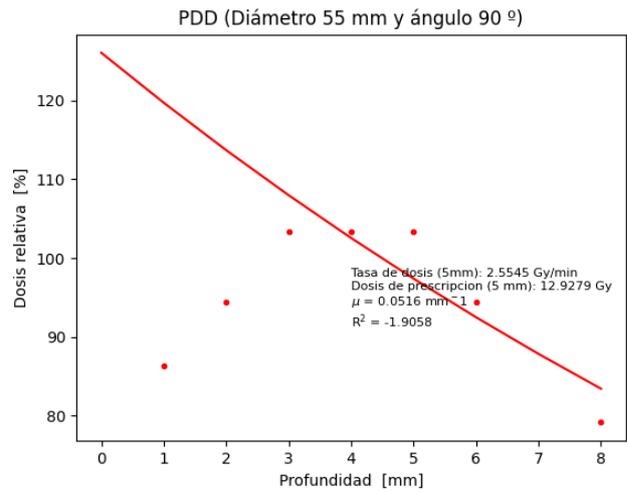
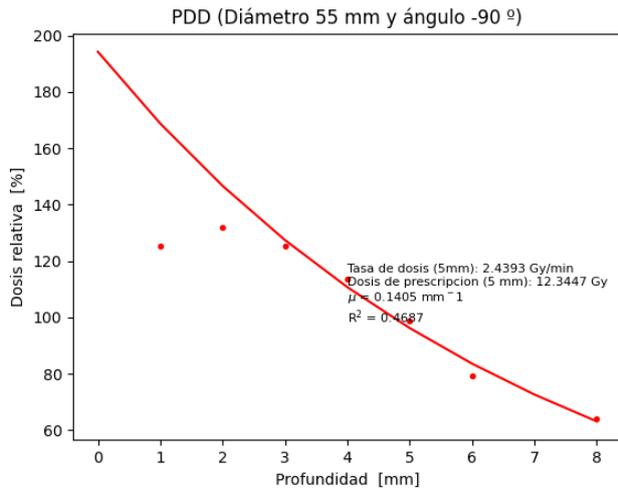
PDD (Diámetro 50 mm y ángulo -90 °)



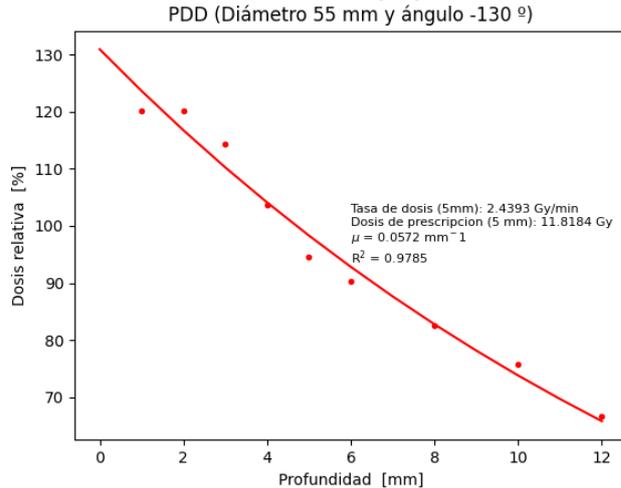
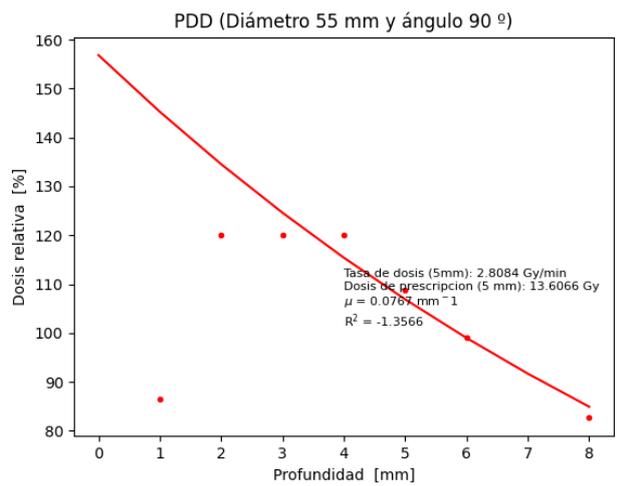
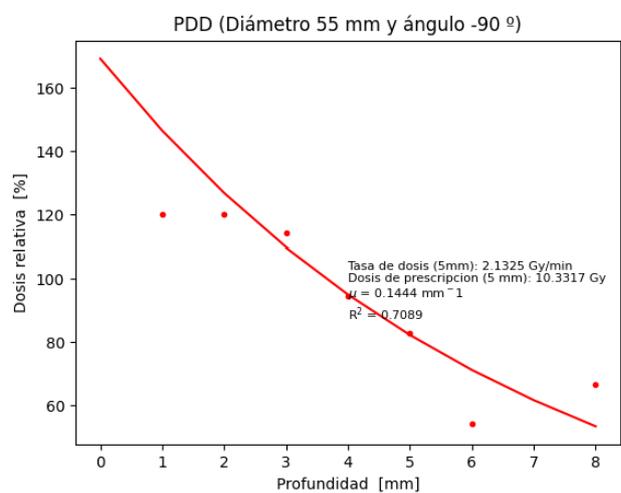
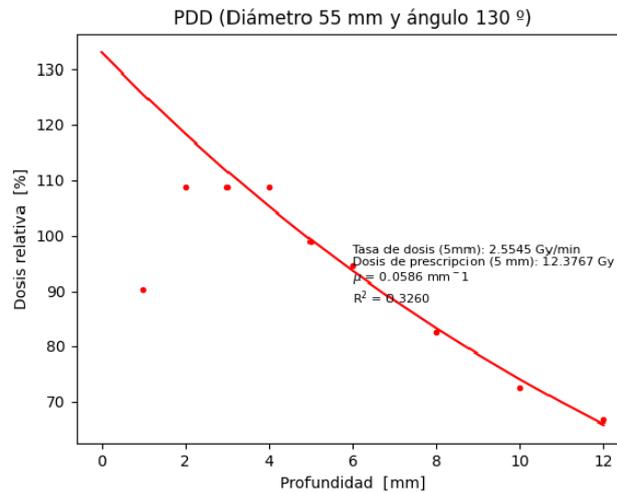
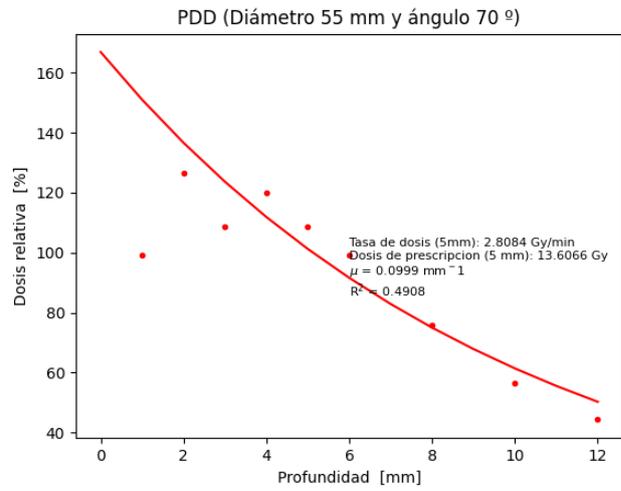
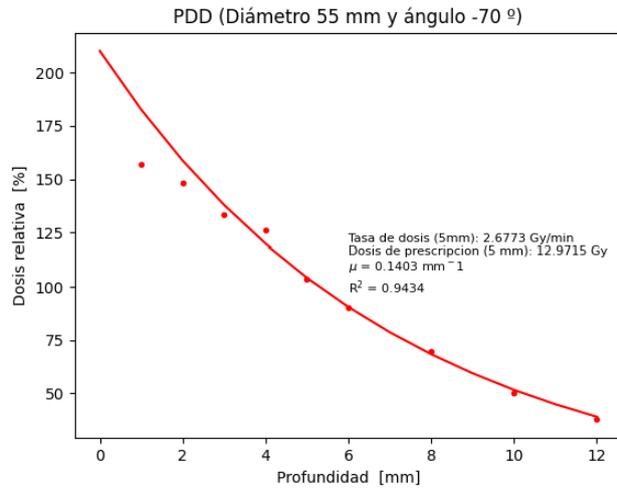


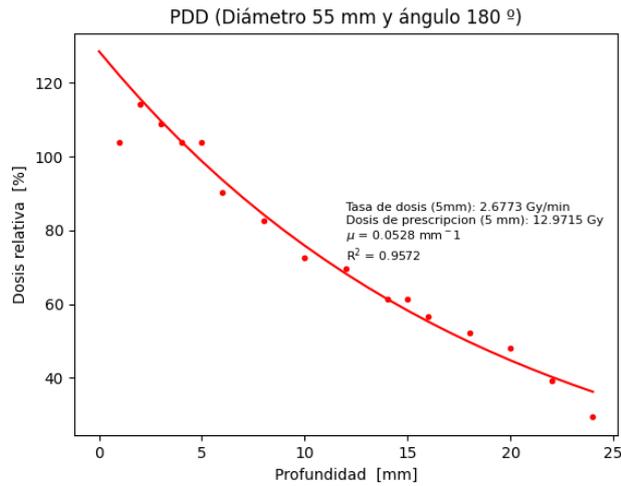
PDD SP55_1





PDD SP55_2



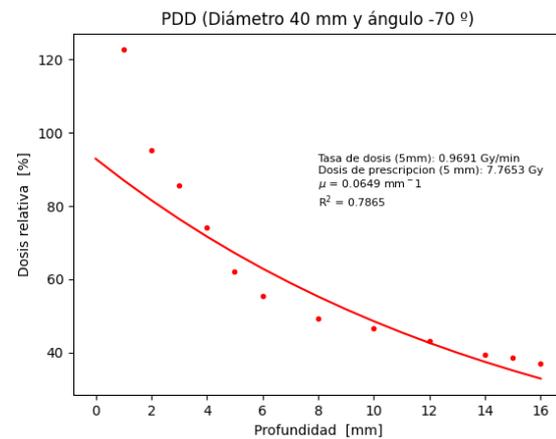
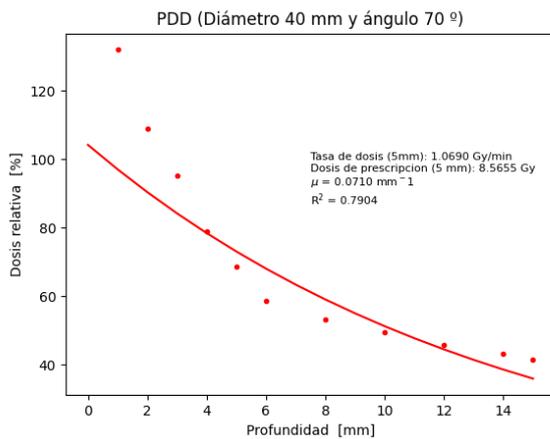


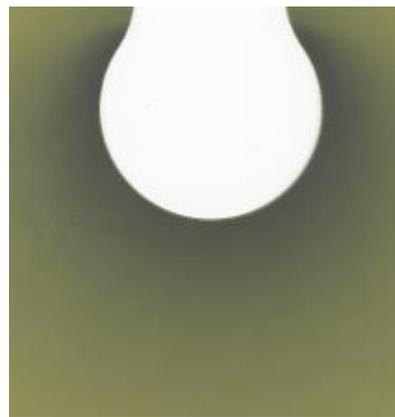
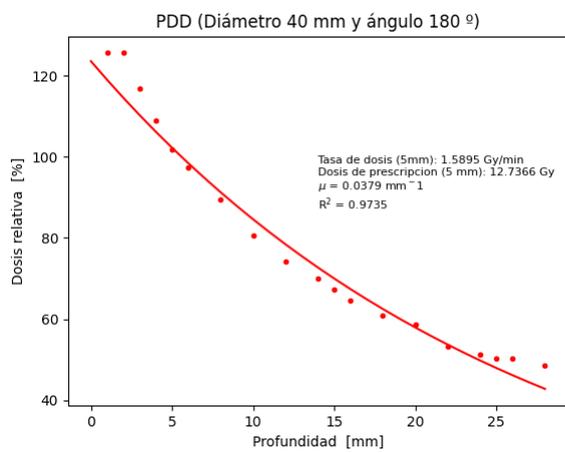
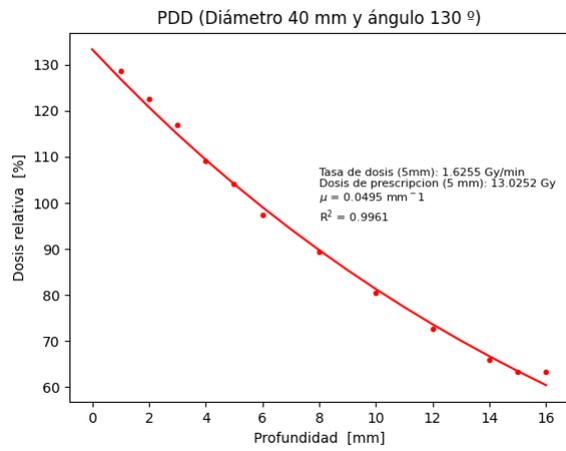
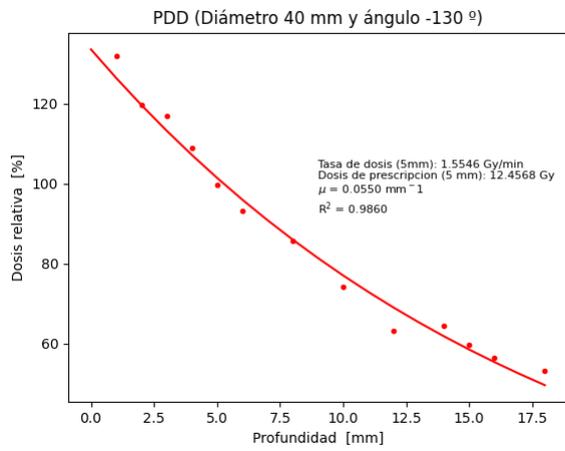
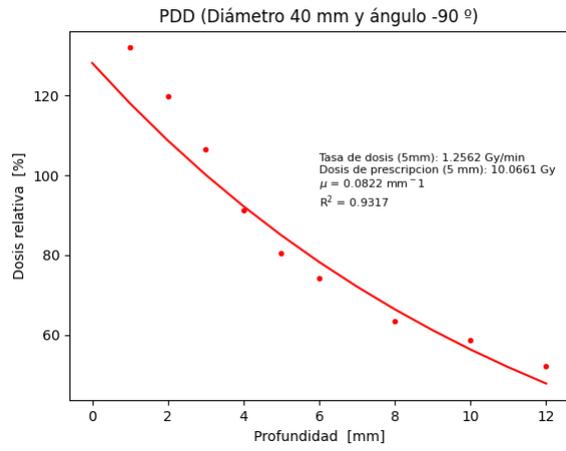
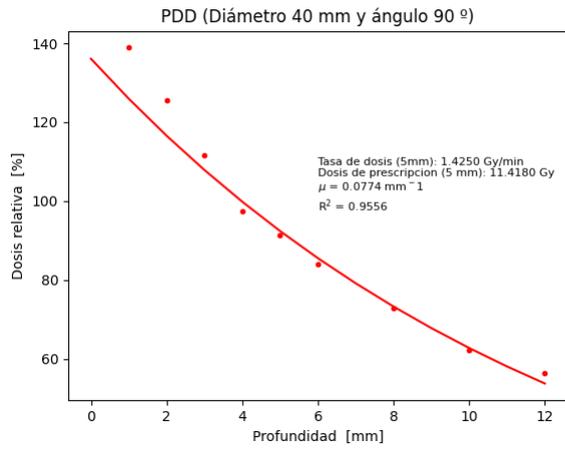
5.2 Películas EBT3

En este apartado se colocarán todas las gráficas obtenidas con la película XR-RV3 cortadas a láser y o a mano y los aplicadores de aluminio y PVC. Para cada aplicador se hicieron varias películas irradiadas, las cuales identificarán mediante un número al final del título de los siguientes apartados.

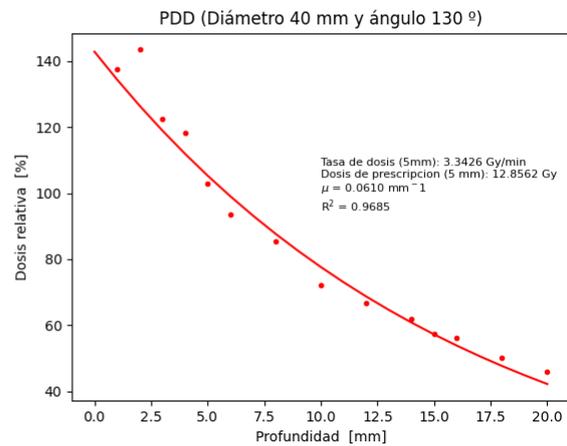
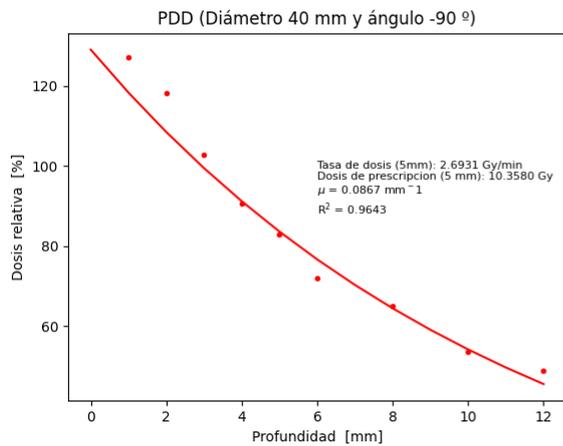
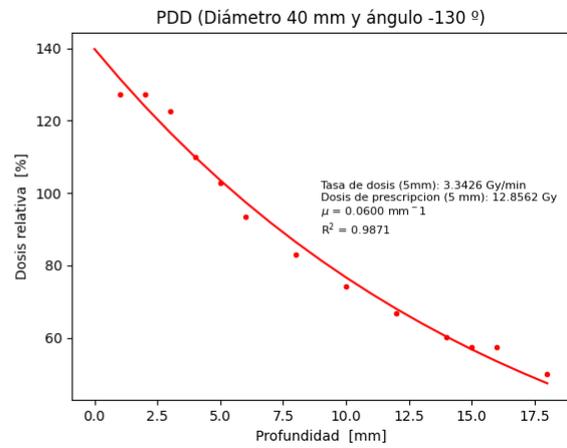
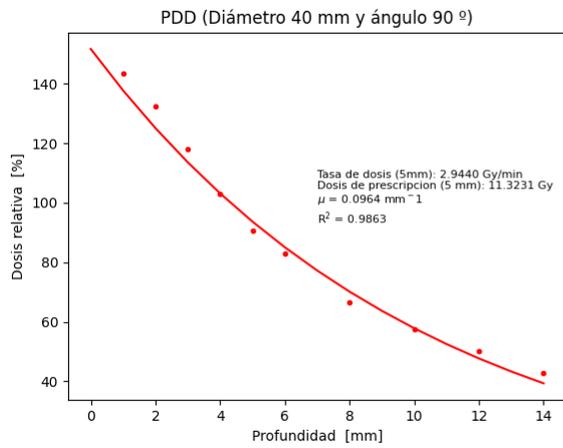
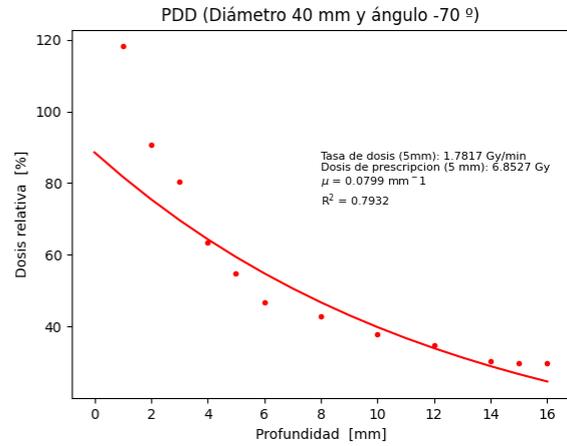
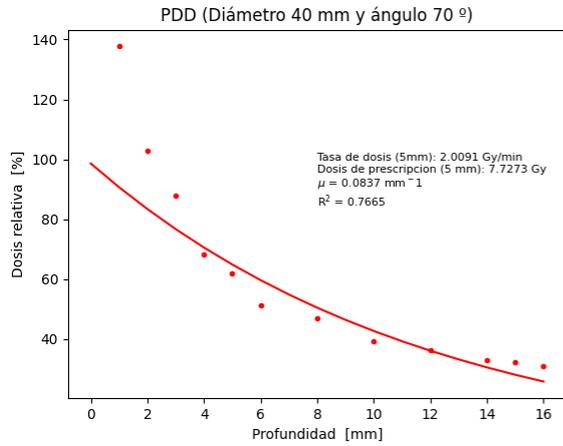
Cortadas a láser

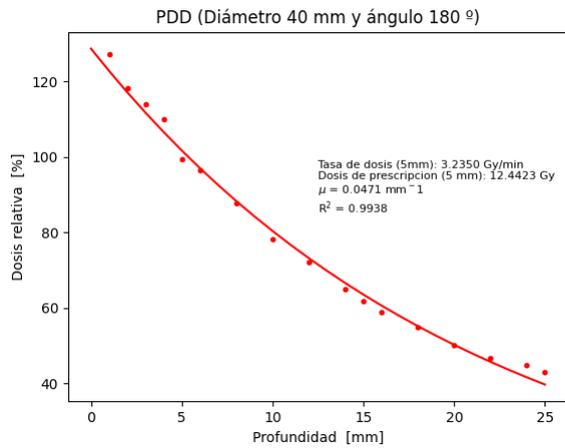
SP40_1



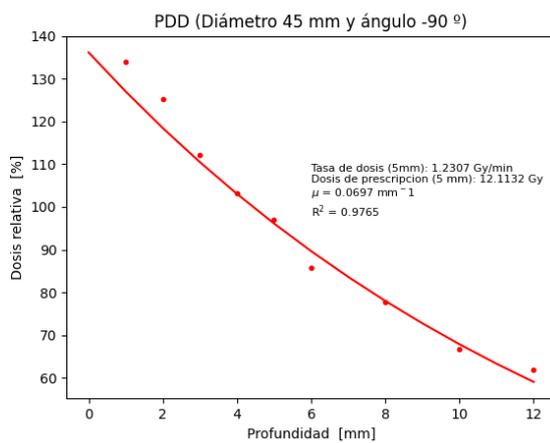
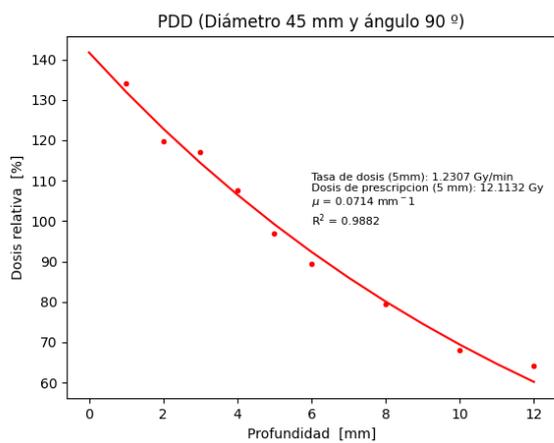
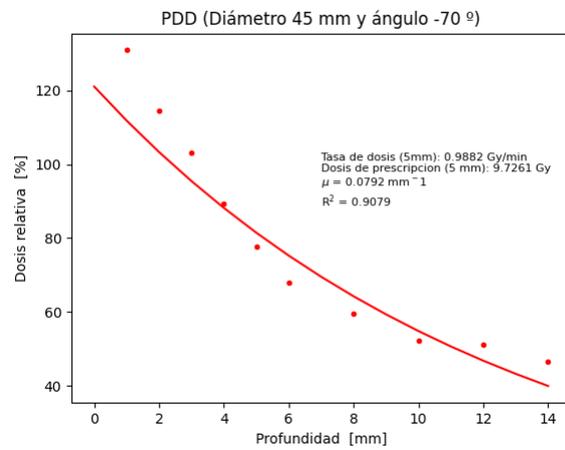
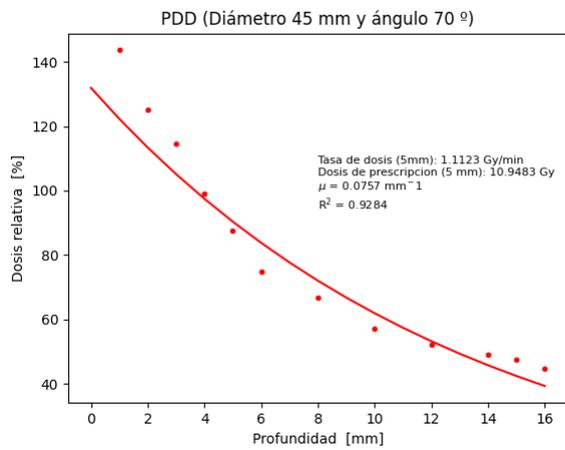


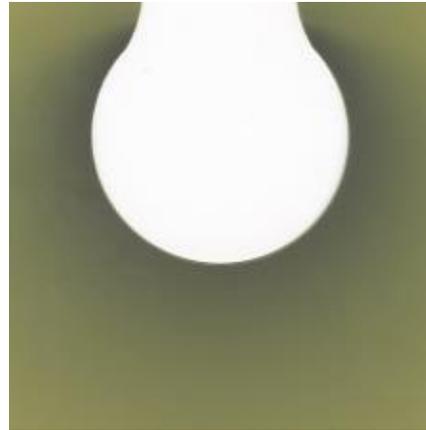
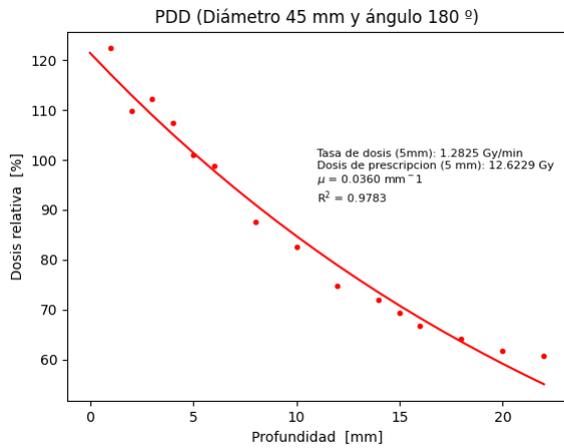
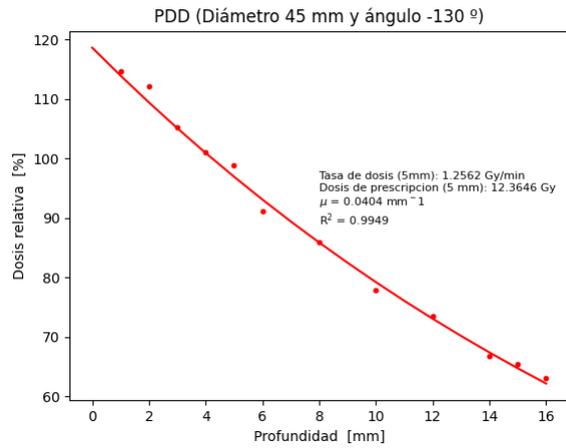
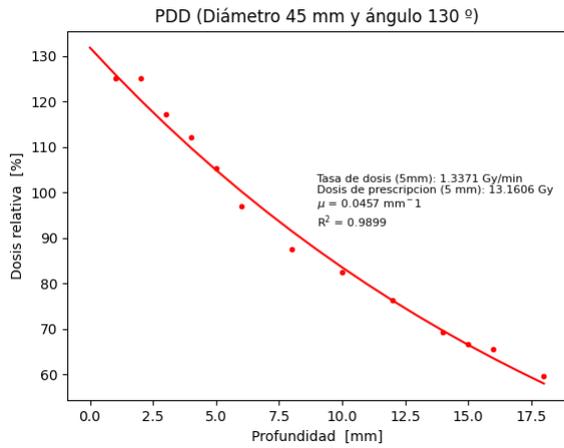
SP40_2



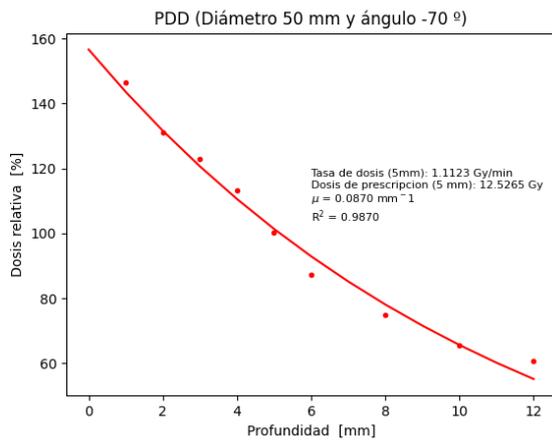
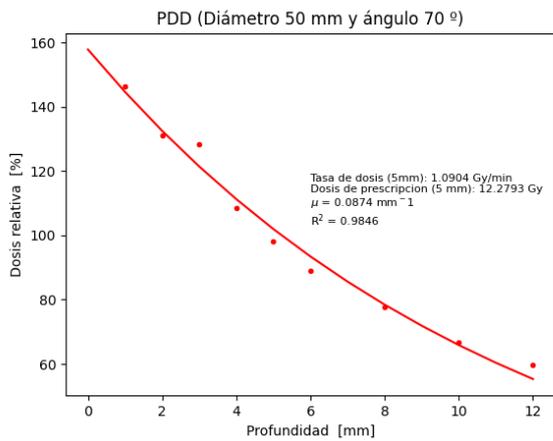


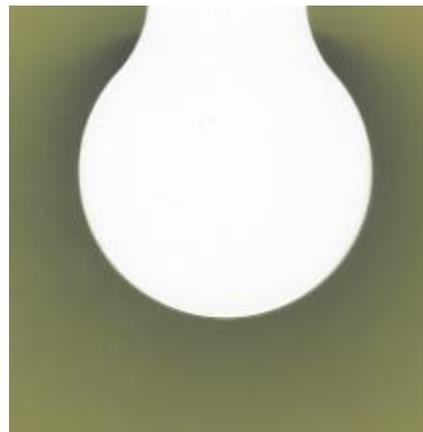
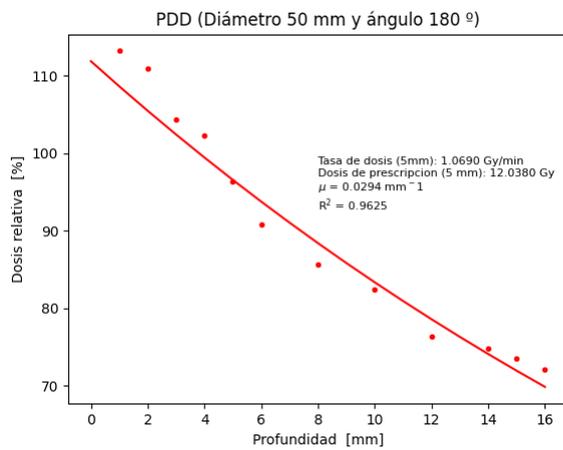
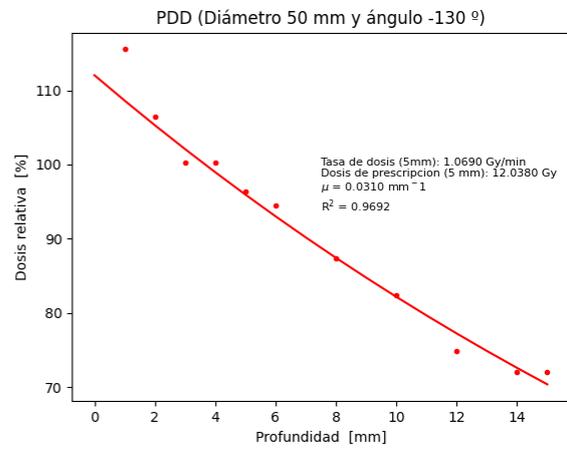
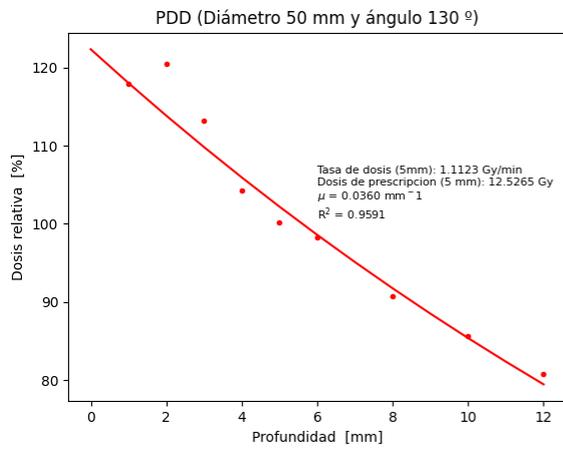
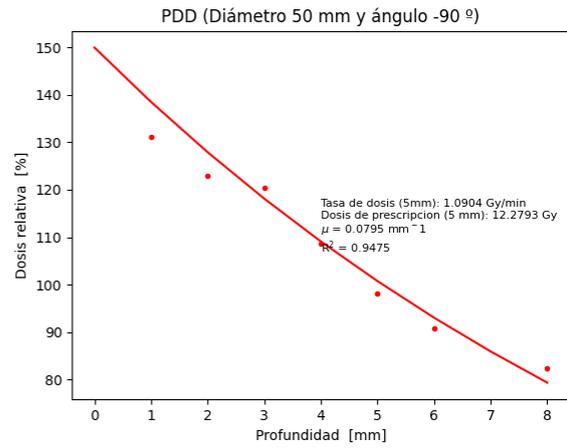
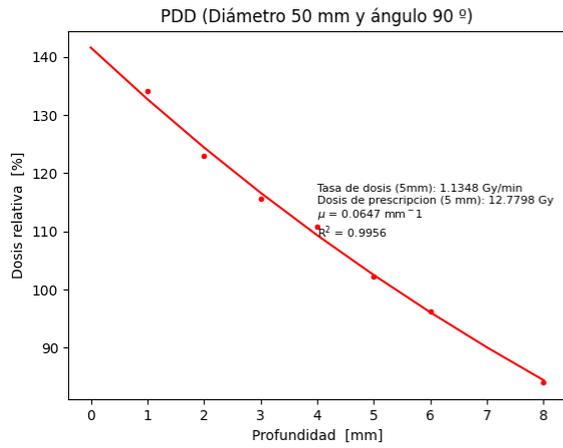
SP45_1



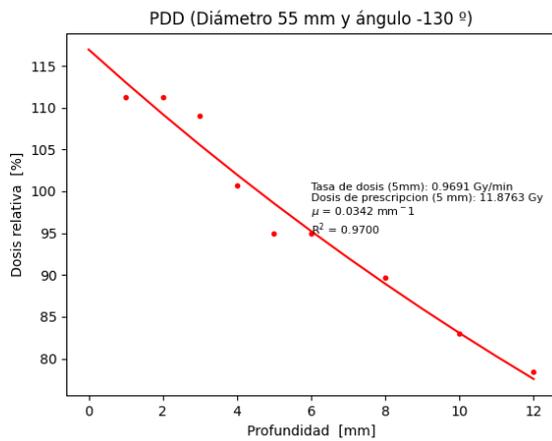
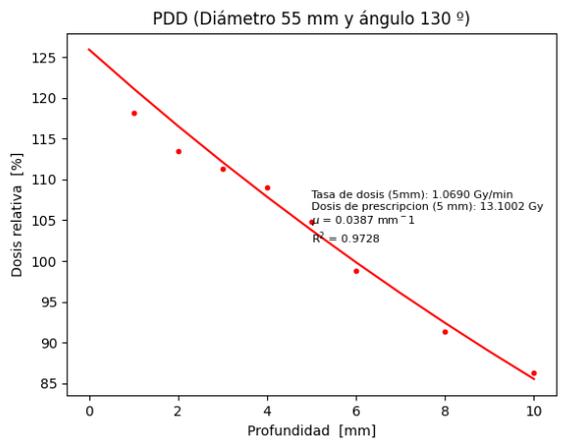
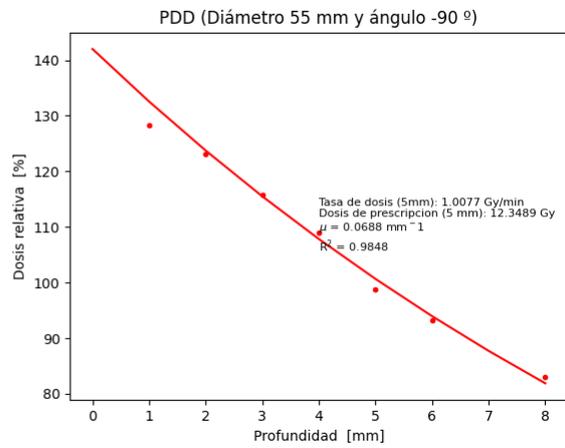
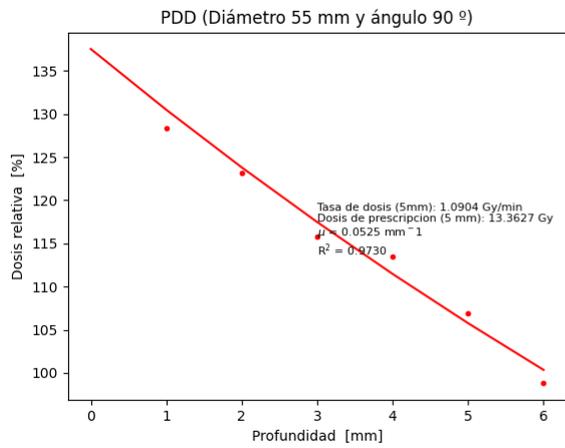
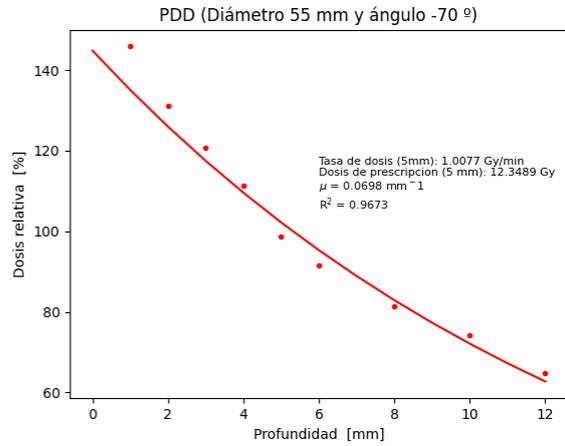
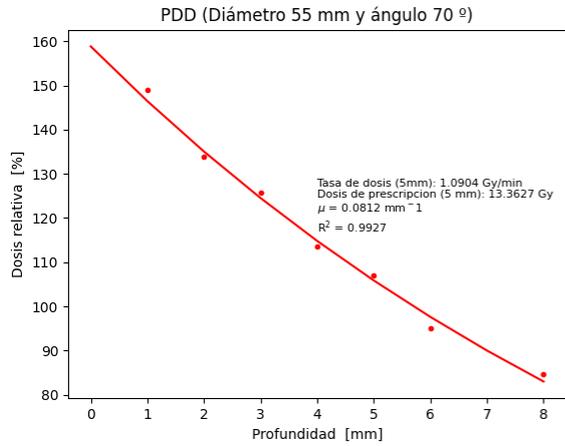


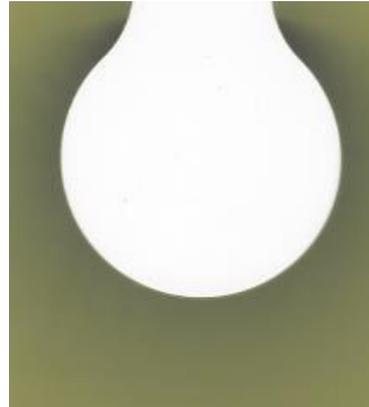
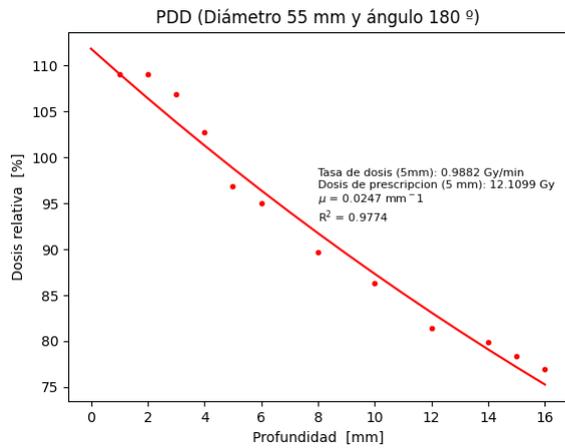
SP50_1



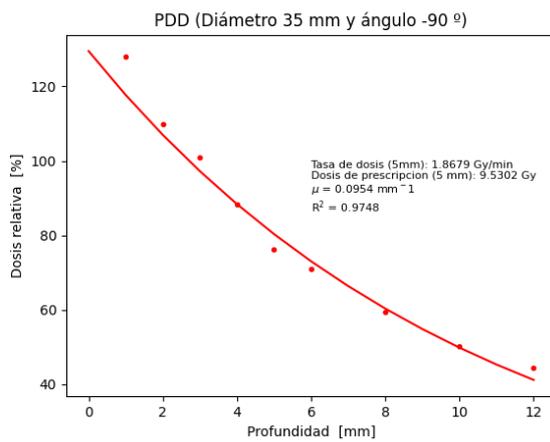
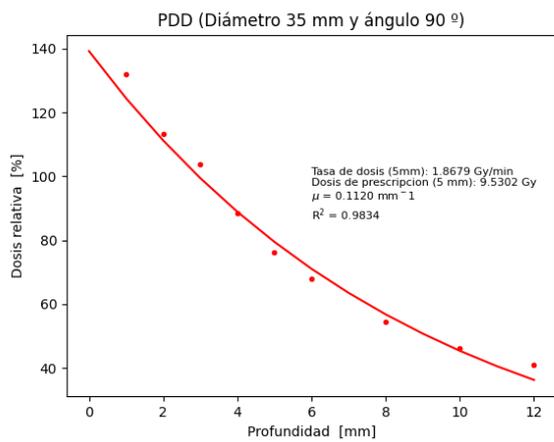
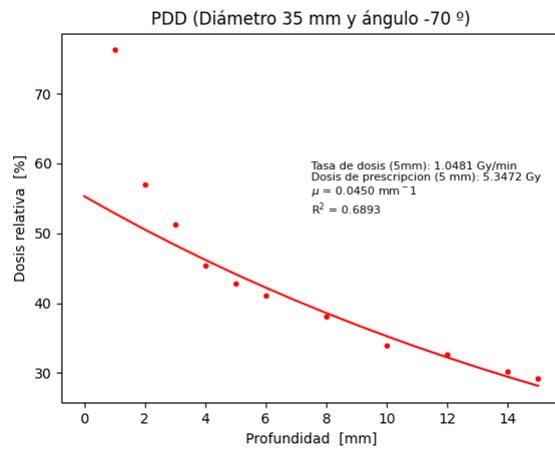
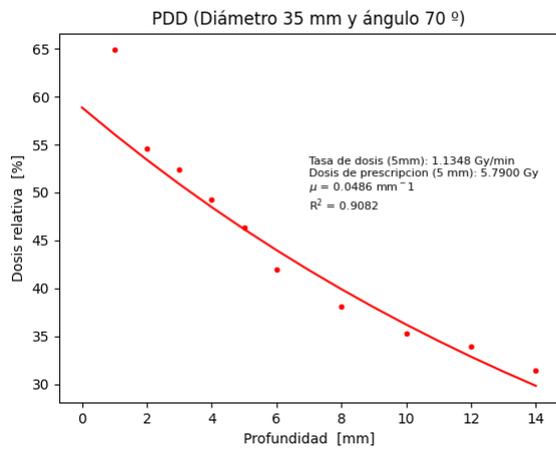


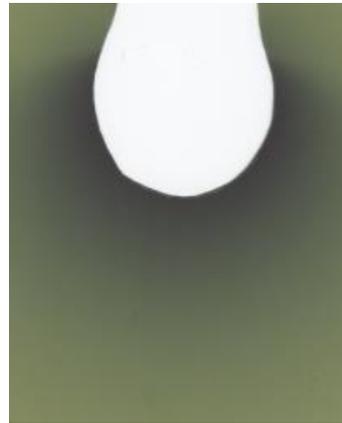
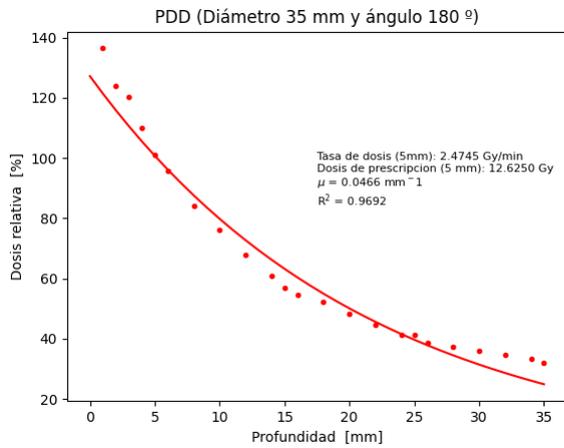
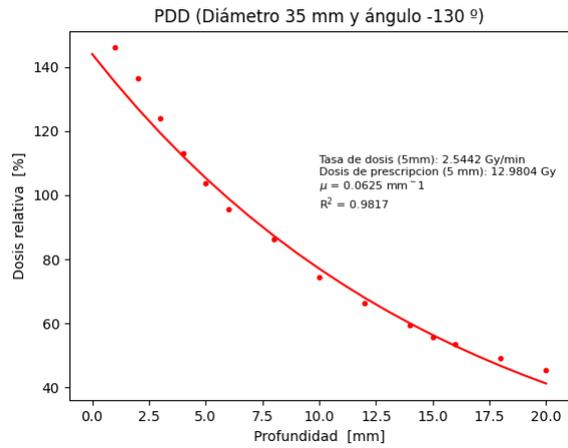
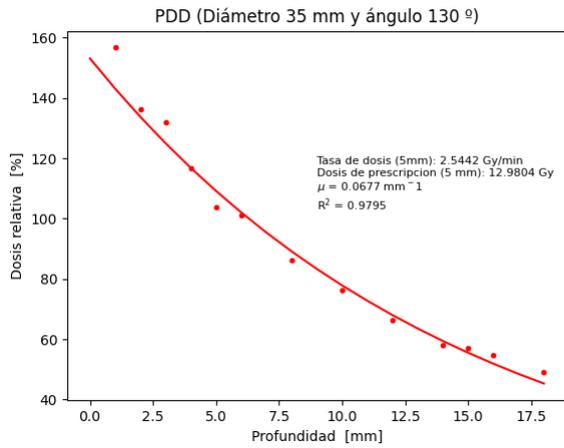
SP55_1



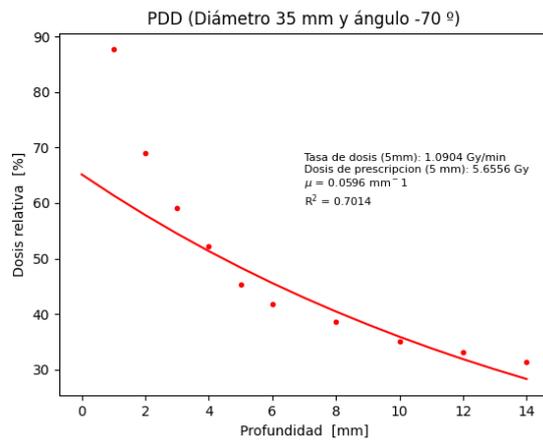
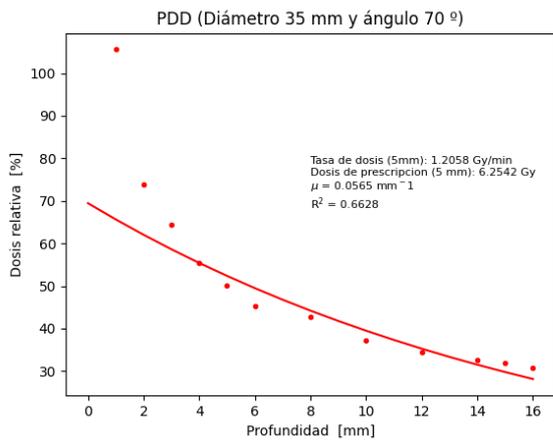


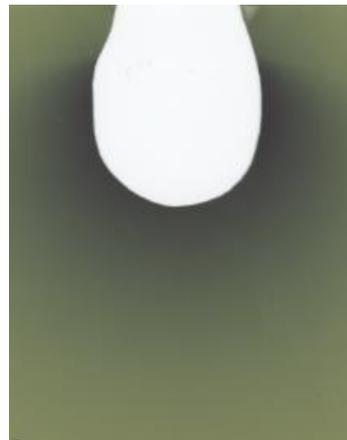
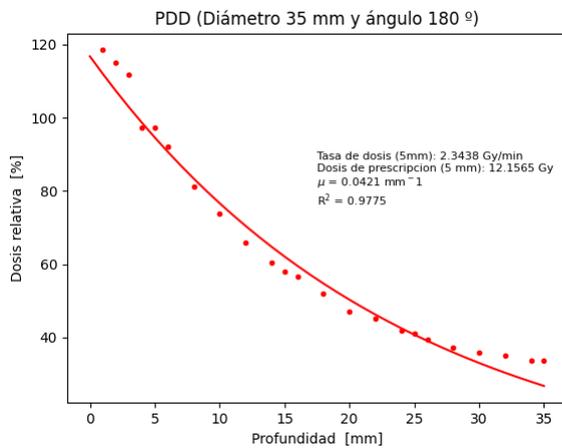
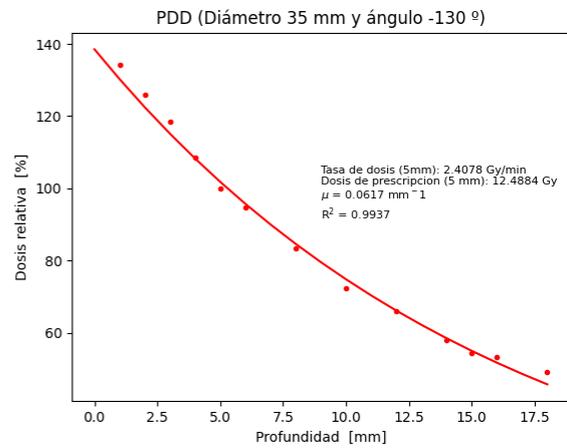
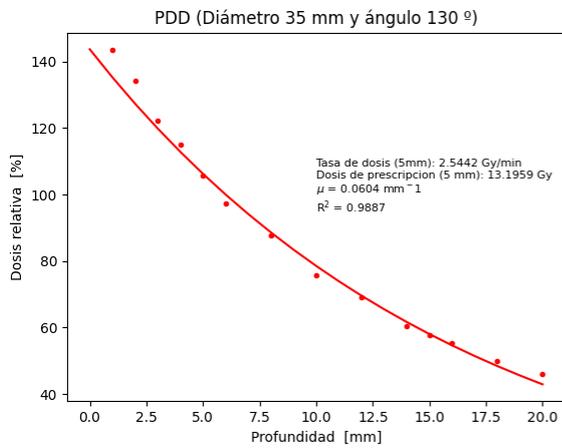
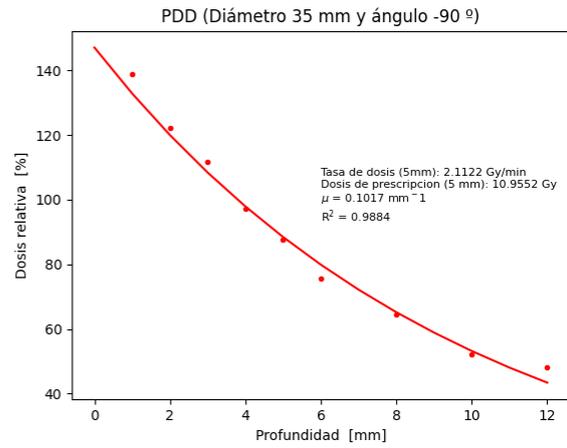
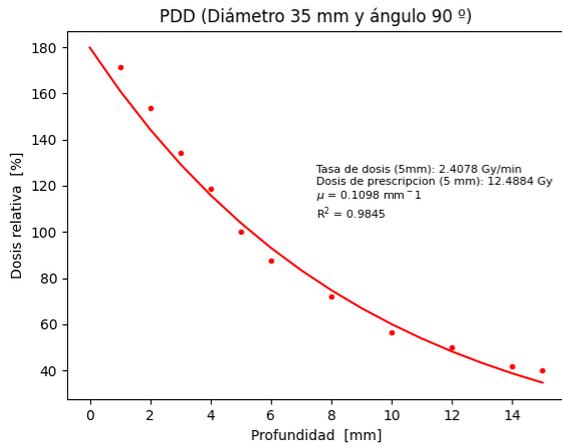
Cortada a mano SP35_1



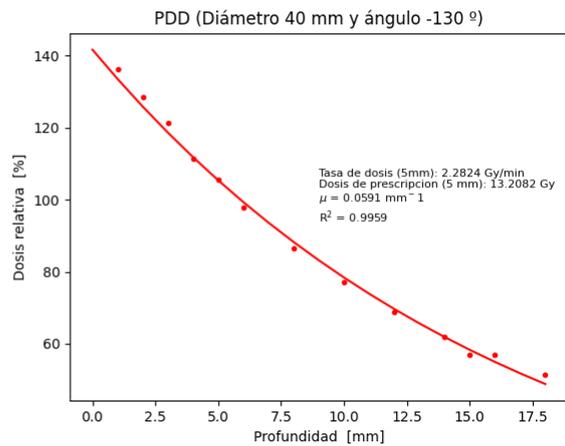
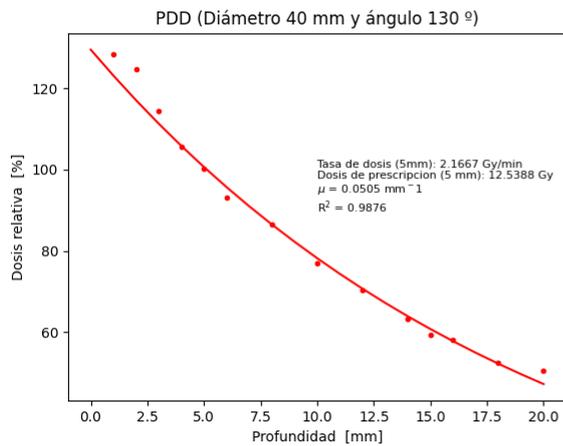
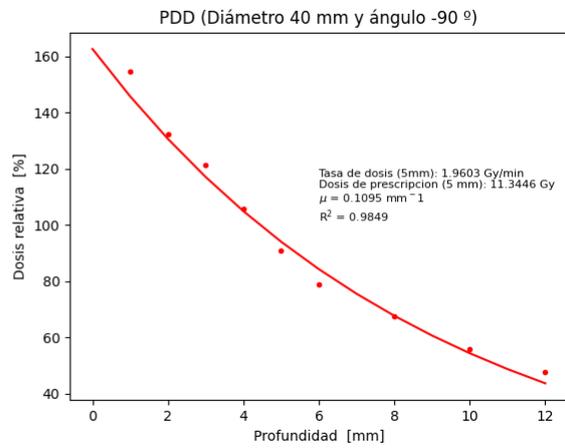
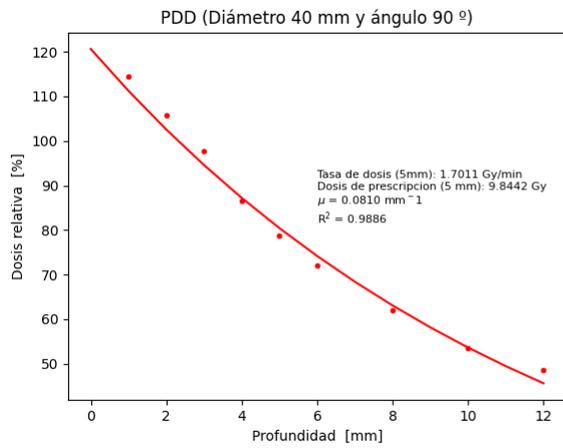
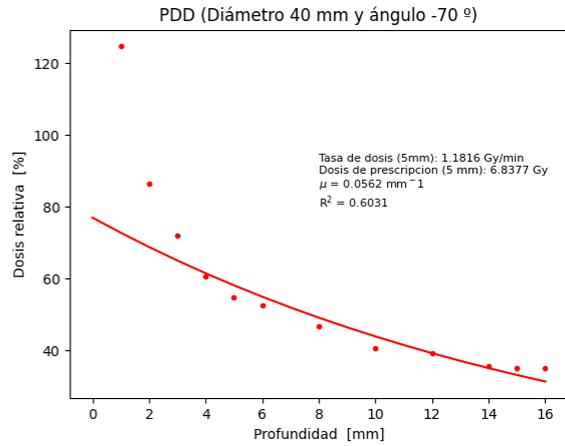
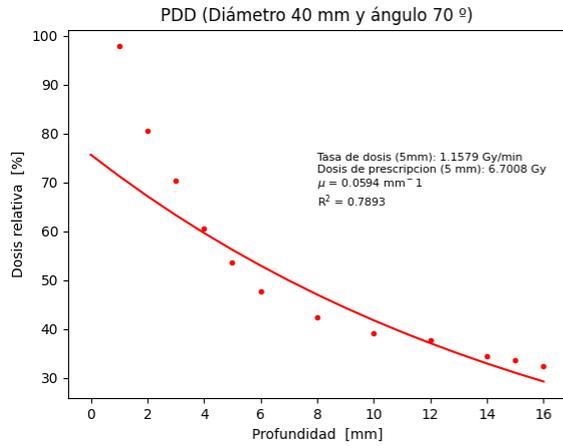


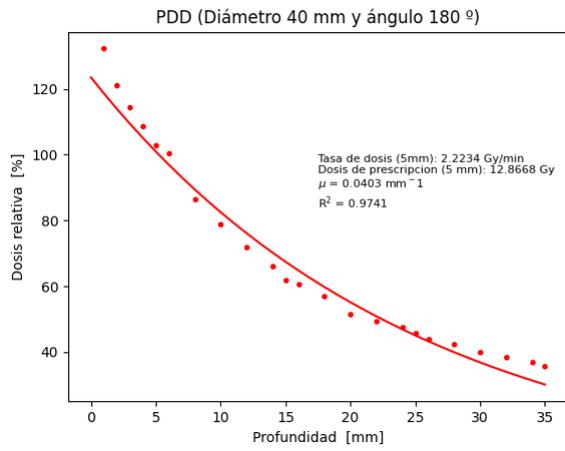
SP35_2



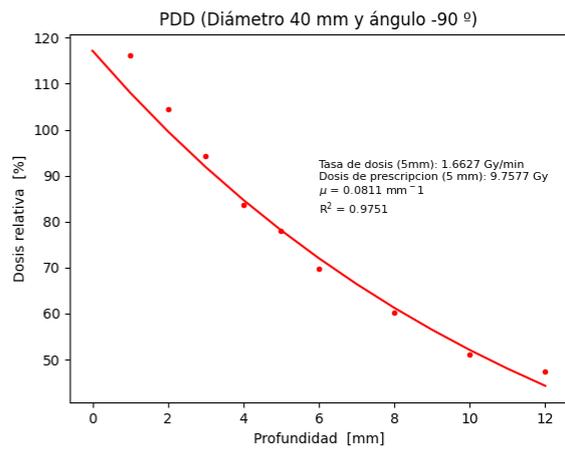
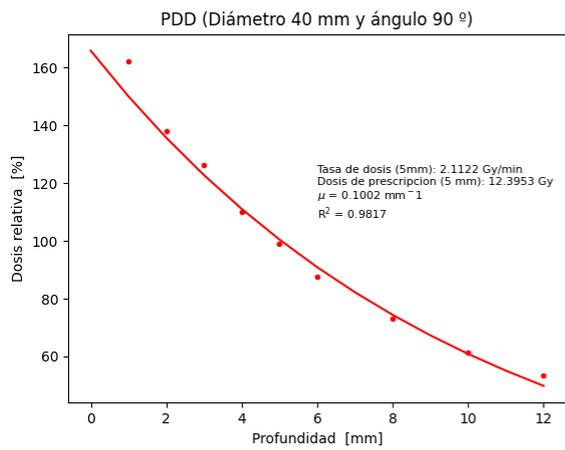
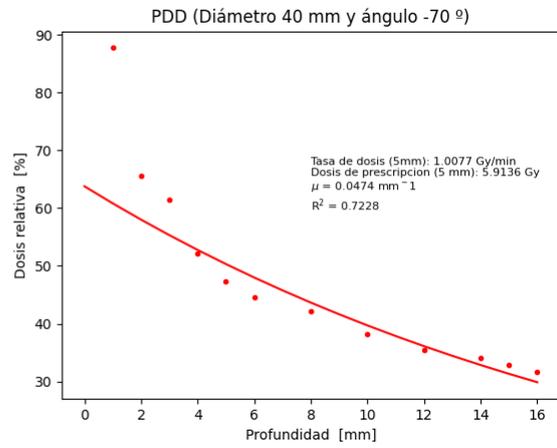
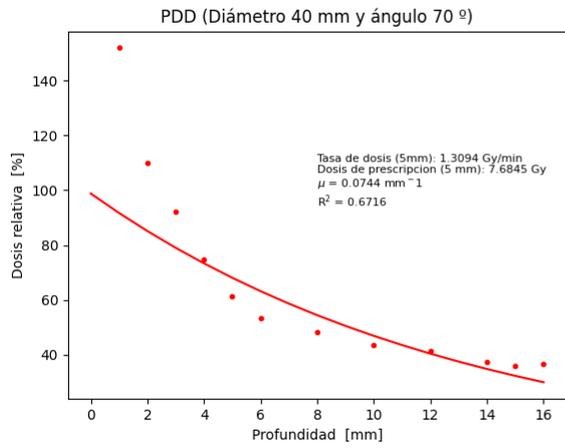


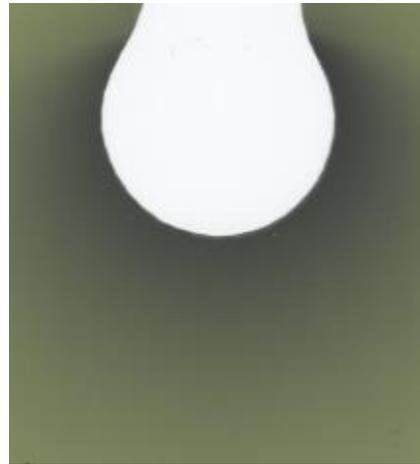
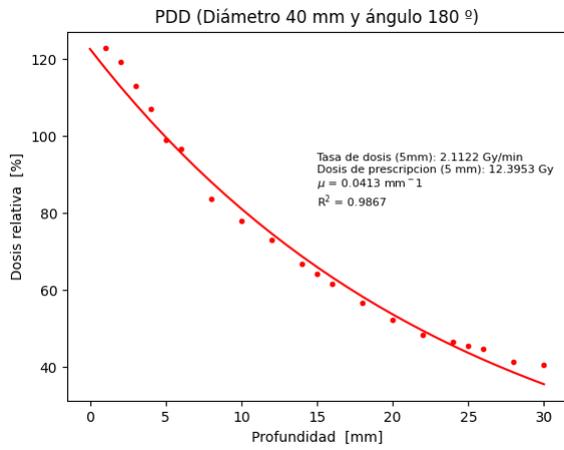
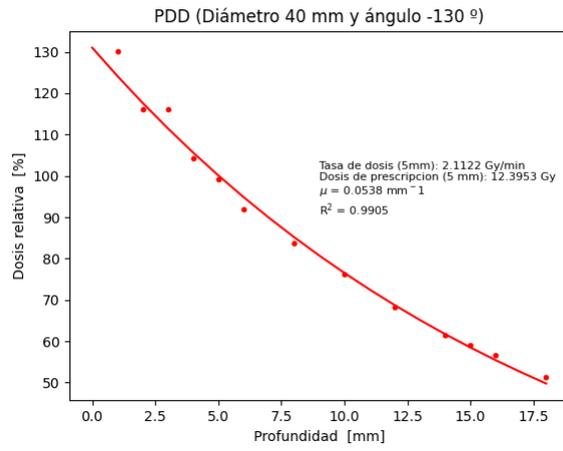
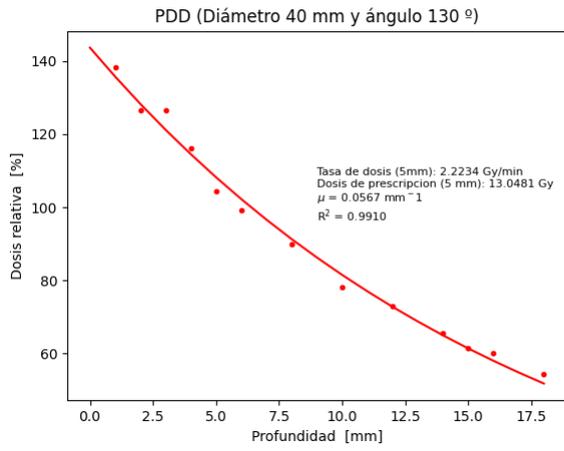
SP40_1



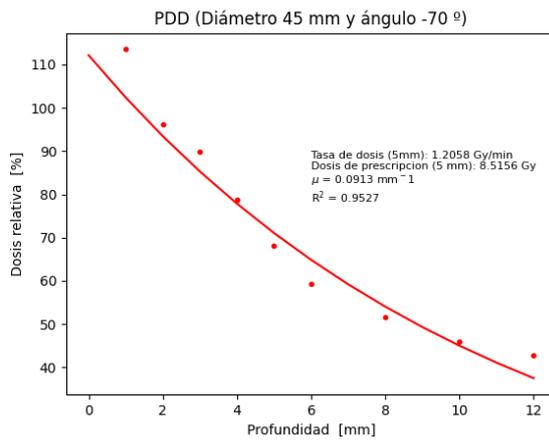
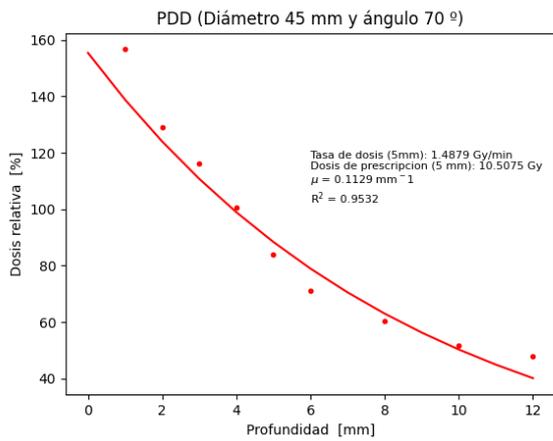


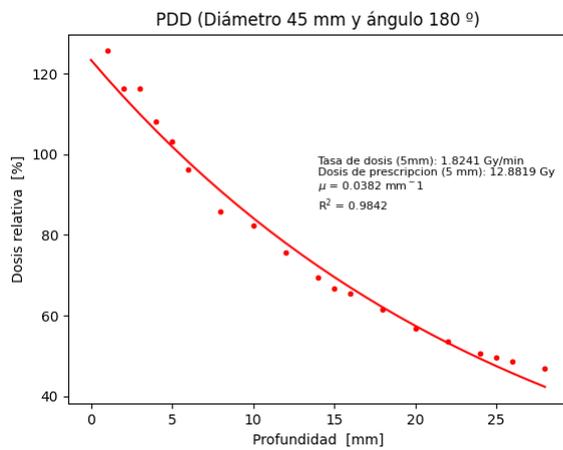
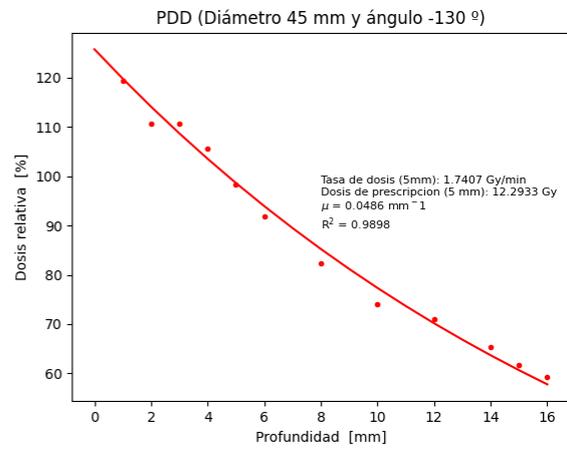
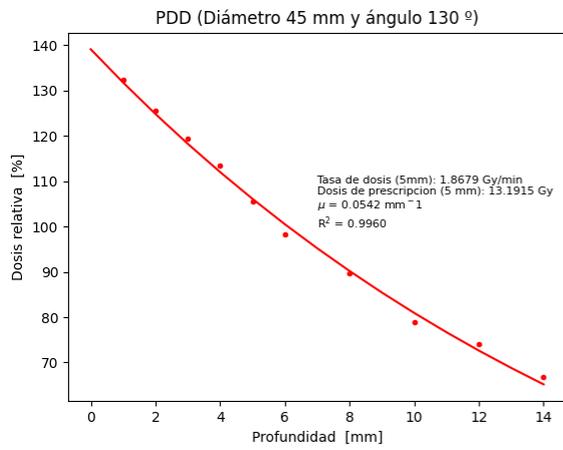
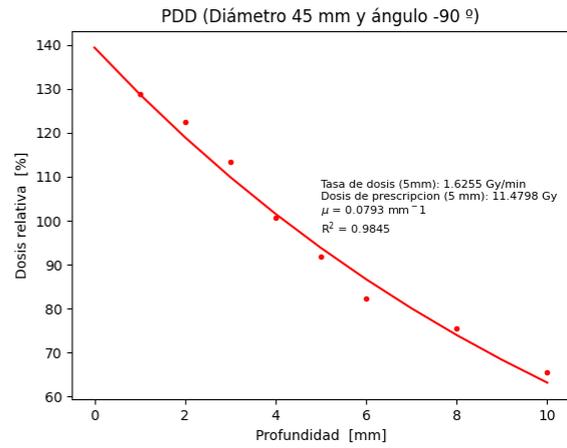
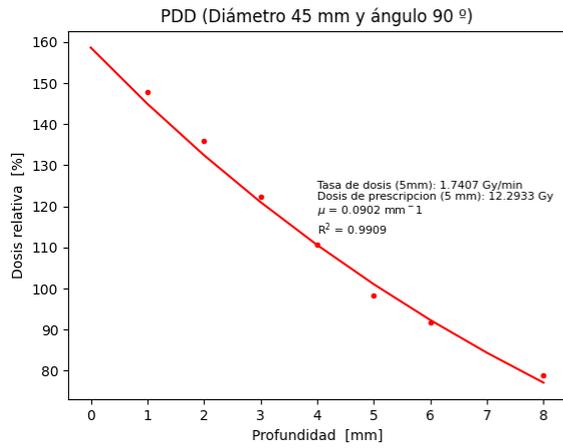
SP40_2



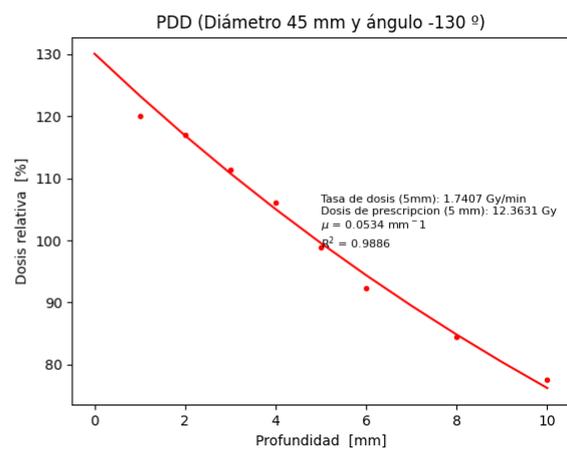
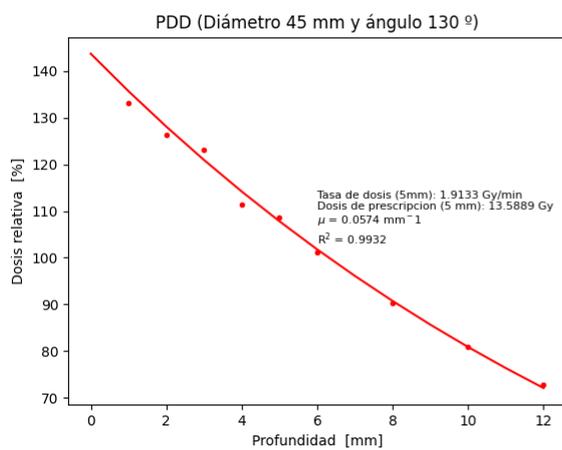
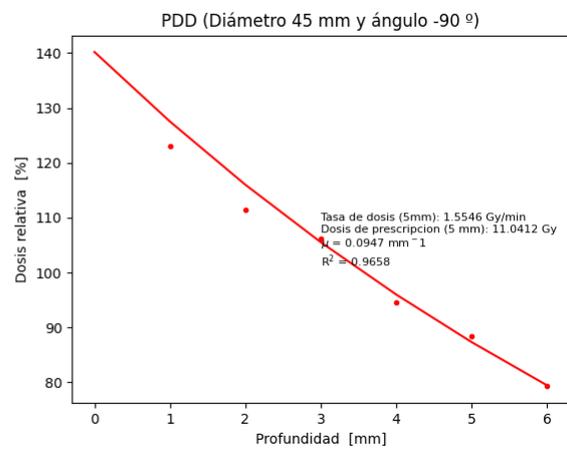
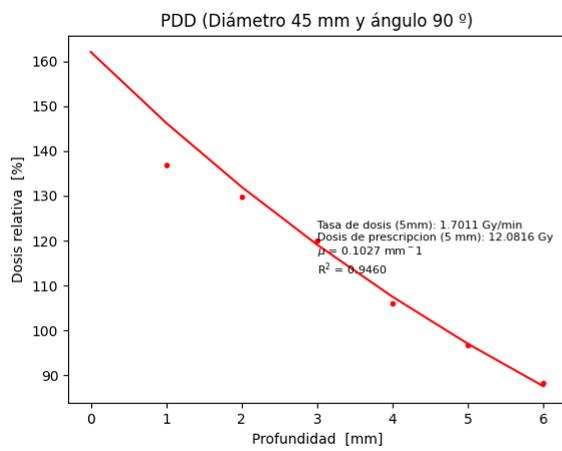
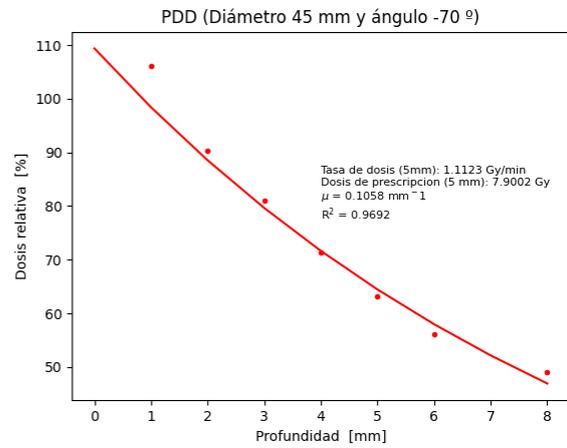
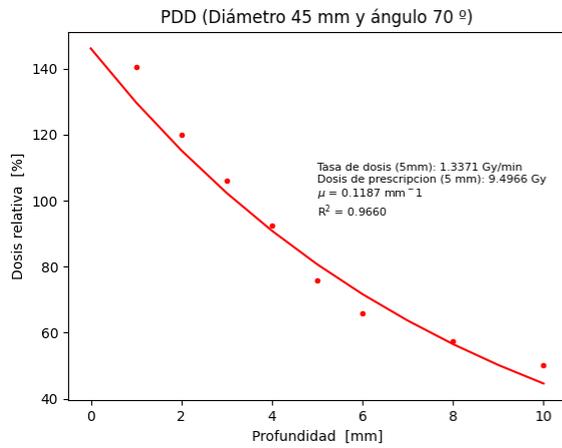


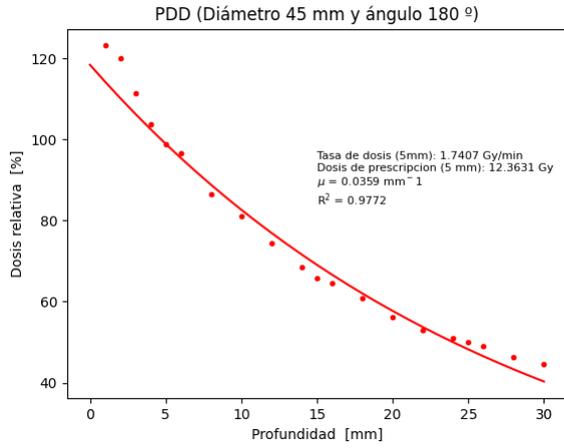
SP45_1



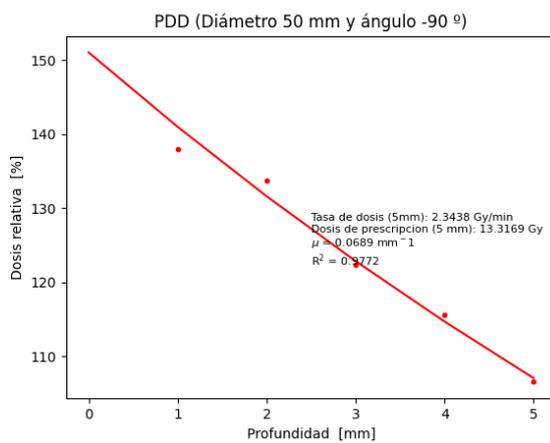
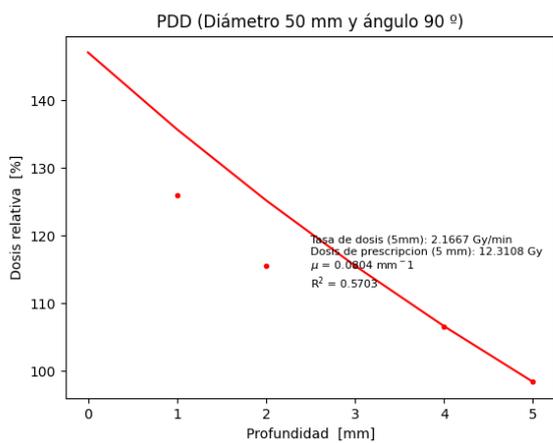
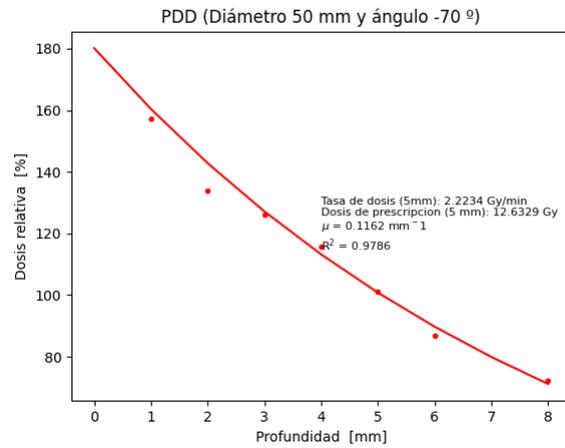
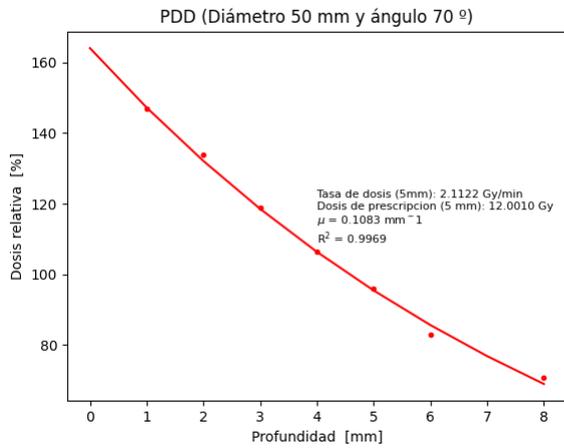


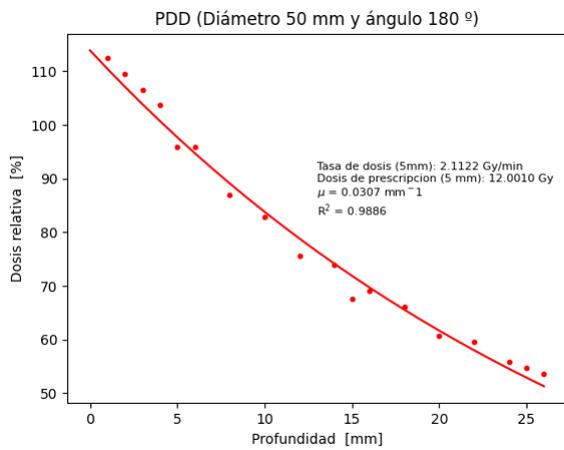
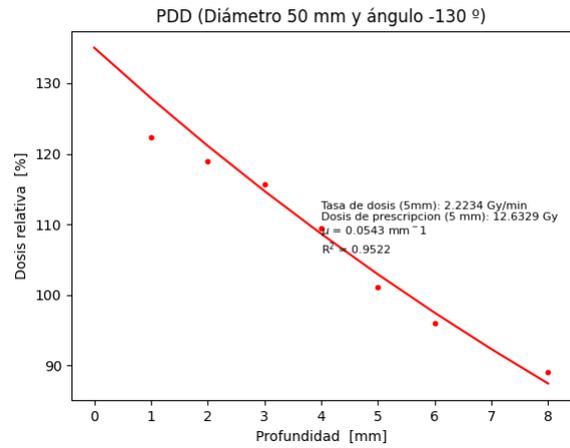
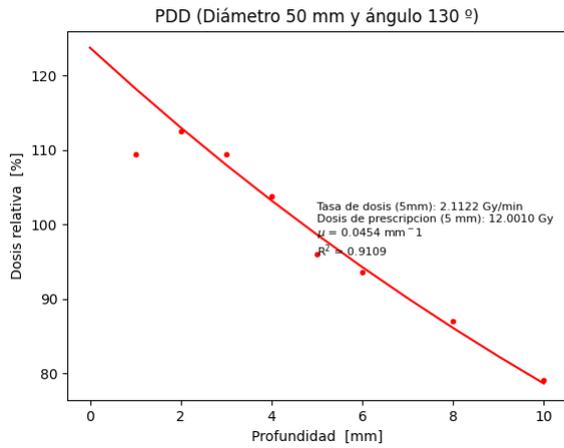
SP45_2



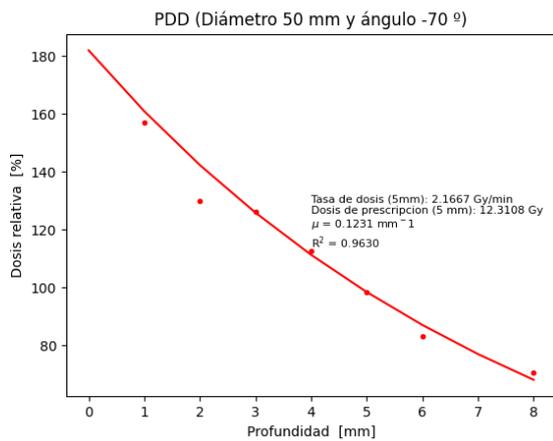
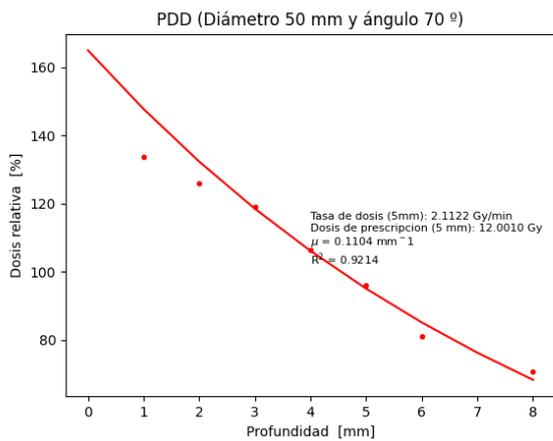


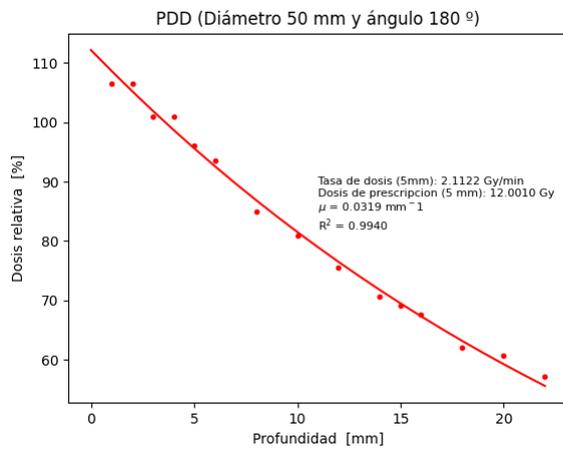
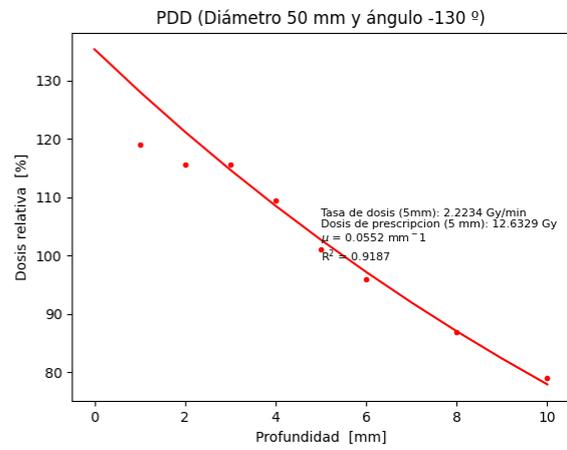
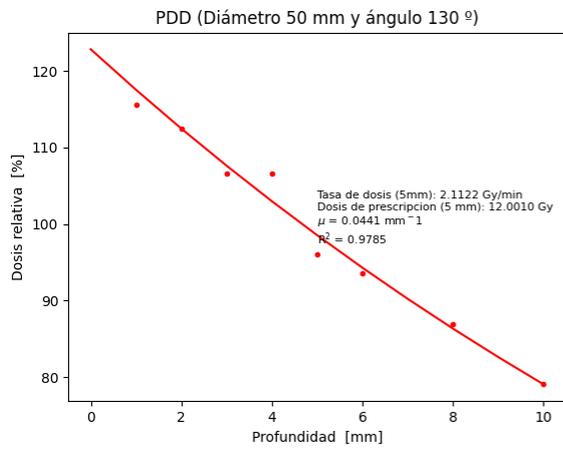
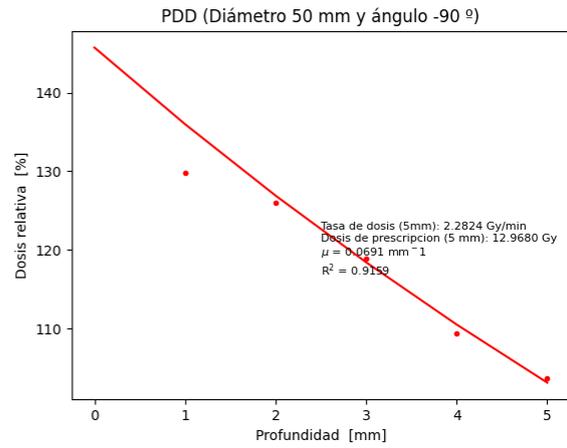
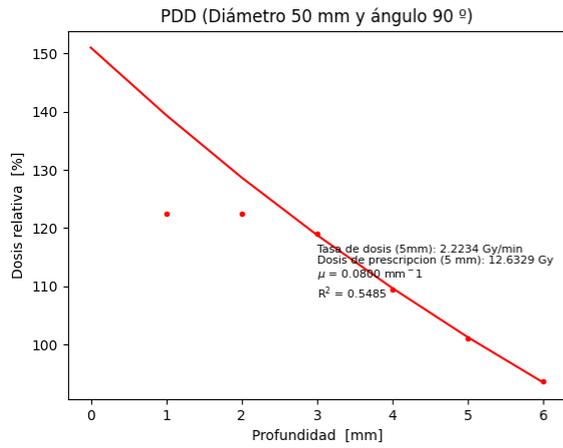
SP50_1



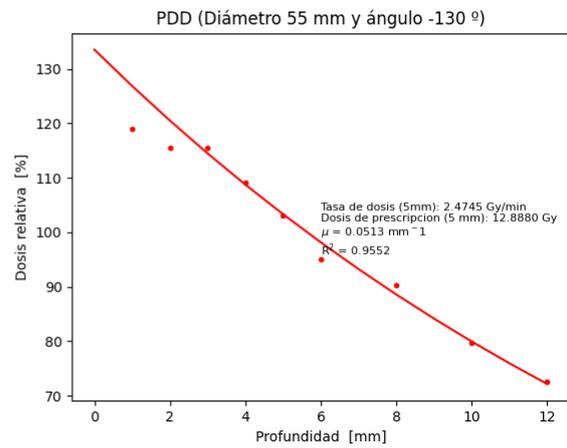
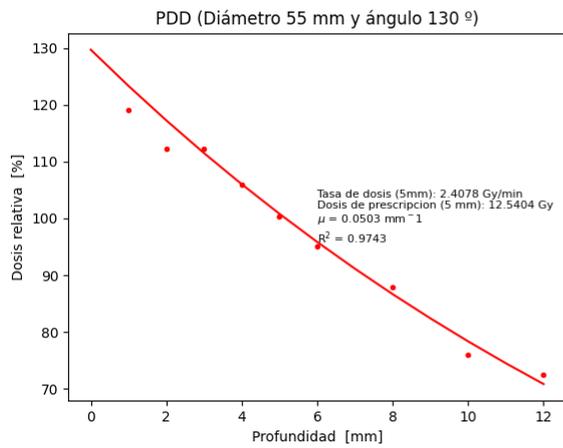
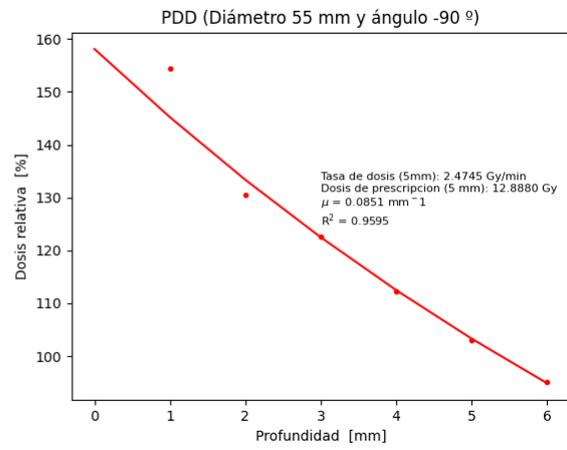
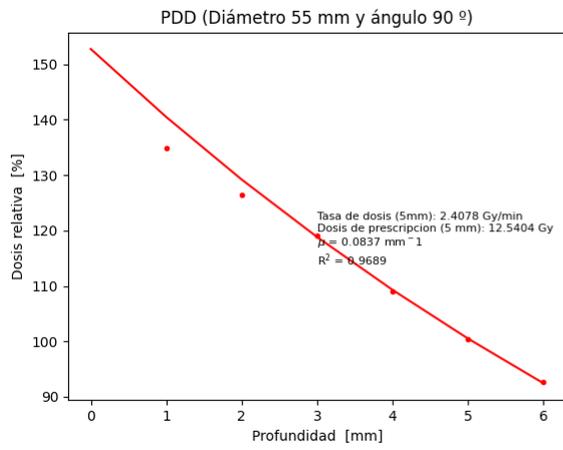
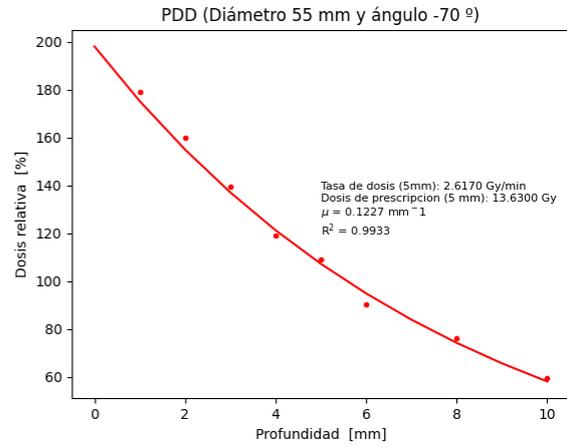
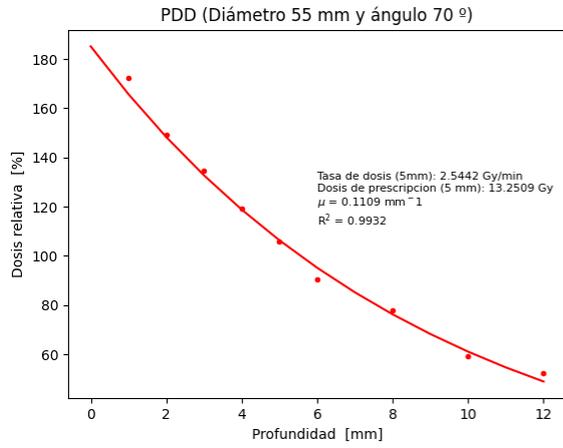


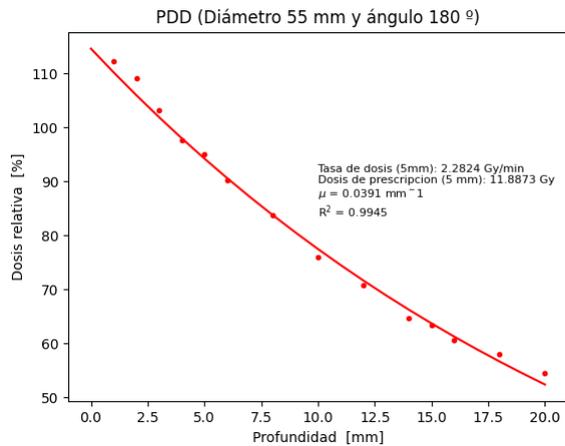
SP50_2





SP55_1





5.3 Archivo .txt

Para analizar los aplicadores de la ioRT-50 se debe de colocar un archivo .txt en el software. Este archivo debe tener tres columnas con los valores de coordenadas X e Y, además de todos los valores de píxel de la imagen.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0	0		35723	
1	0		34952	
2	0		33924	
3	0		33410	
4	0		33153	
5	0		32896	
6	0		32896	
7	0		32639	
8	0		32639	
9	0		32382	
10	0		32639	
11	0		32896	
12	0		32639	
13	0		32639	

5.4 Tabla de datos.

En esta sección se colocarán las tablas utilizadas para obtener los resultados y conclusiones de este trabajo. Estas tablas se han generado a partir de las gráficas mostradas anteriormente.

La tabla de la película XR - RV3:

SP35					
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	3,28	3,72	0,44	12
	2º	3,51	3,66	0,15	4
	3º	5,8	4,62	1,18	20
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	8,18	9,91	1,73	17
	2º	8,04	6,10	1,93	24
	3º	9,3	8,78	0,52	6
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,2	13,2	0,00	0
	2º	13,0	13,0	0,00	0
	3º	12,9	12,0	0,88	7
Dosis a 5 mm (Gy)					
		1º	2º	3º	
180º		13,21	15,39	13,89	
SP40					
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	9,42	8,43	0,99	11
	2º	7,9	5,39	2,51	32
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	14,9	13,9	1,07	7
	2º	12,6	12,6	0	0
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,9	12,9	0	0
	2º	13,4	11	2,39	18
Dosis a 5 mm (Gy)					
		1º	2º		
180º		9,99	12,55		
SP45					
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	10,1	10,7	0,53	5
	2º	12,2	5,93	6,27	51
	3º	9,52	8,25	1,27	13
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	14,1	14,1	0	0
	2º	15,2	1,23	13,93	92
	3º	4,53	13,1	8,55	65
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	14,1	14,1	0	0
	2º	16,1	12,9	3,22	20
	3º	13,9	13,9	0	0
Dosis a 5 mm (Gy)					

		1º		2º		3º	
180º		5,4		12,2		11,7	
SP50							
		70º	-70º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)		Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)	
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,6	13,6	0		0	
	2º	15,3	11,8	3,5		23	
		90º	-90º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)		Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)	
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13	13	0		0	
	2º	13,37	12,4	0,991		7	
		130º	-130º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)		Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)	
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13	13,6	0,67		5	
	2º	12,4	12,4	0,01		0	
Dosis a 5 mm (Gy)							
				1º		2º	
180º		13,33				12,27	
SP55							
		70º	-70º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)		Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)	
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,9	14,2	1,29		9	
	2º	13,6	13	0,62		5	
		90º	-90º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)		Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)	
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,3	12,9	0,58		4	
	2º	13,1	13,3	0,24		2	
		130º	-130º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)		Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)	
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,3	13,5	1,2		9	
	2º	12,4	11,8	0,57		5	
Dosis a 5 mm (Gy)							
				1º		2º	
180º		10,8				12,97	

La tabla de la película EBT3 cortada a laser:

		SP40			
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	8,57	7,77	0,8	9
	2º	7,72	6,85	0,87	11
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	11,4	10,1	1,35	12
	2º	11,3	10,4	0,97	9
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13	12,5	0,56	4
	2º	12,6	12,9	0,26	2
Dosis a 5 mm (Gy)					
1º					
180º		12,73			12,44
		SP45			
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	11	9,73	1,22	11,14155251
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,1	12,1	0	0
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,2	12,4	0,76	5,775075988
Dosis a 5 mm (Gy)					
1º					
180º		12,64			
		SP50			
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,3	12,5	0,26	2
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,8	12,3	0,51	4
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,5	12	0,48	4
Dosis a 5 mm (Gy)					
1º					
180º		12,04			
		SP55			
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)

Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,4	12,4	1,01	8
		90º	-90º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,4	12,4	1,01	8
		130º	-130º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,1	11,9	1,22	9
		Dosis a 5 mm (Gy)			
		1º			
180º		12,1			

La tabla de la película EBT3 cortada a mano:

		SP35			
		70º	-70º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	5,79	5,34	0,45	8
	2º	6,25	6,65	0,4	6
		90º	-90º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	9,53	9,53	0	0
	2º	12,5	11	1,54	12
		130º	-130º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13	13	0	0
	2º	13,2	12,5	0,7	5
		Dosis a 5 mm (Gy)			
		1º		2º	
180º		12,63		12,15	
		SP40			
		70º	-70º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	6,7	6,83	0,13	2
	2º	7,68	5,91	1,77	23
		90º	-90º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	9,84	11,3	1,5	13
	2º	12,4	9,75	2,65	21
		130º	-130º	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,5	13,2	0,66	5
	2º	12	12,4	0,36	3
		Dosis a 5 mm (Gy)			
		1º		2º	
180º		12,87		12,4	
		SP45			

		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	10,5	8,51	2	19
	2º	9,5	7,9	1,6	17
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,3	11,5	0,83	7
	2º	12,1	11	1,04	9
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,2	12,3	0,89	7
	2º	13,6	12,4	1,22	9
Dosis a 5 mm (Gy)					
			1º		2º
180º		12,89			12,37
SP50					
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12	12,6	0,64	5
	2º	12	12,3	0,3	2
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,3	13,3	1,01	8
	2º	12,6	13	0,33	3
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12	12,6	0,63	5
	2º	12	12,6	0,63	5
Dosis a 5 mm (Gy)					
			1º		2º
180º		12			12
SP55					
		70°	-70°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	13,3	13,6	0,38	3
		90°	-90°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,5	12,5	0	0
		130°	-130°	Diferencia absoluta de dosis a 5mm (Gy)	Diferencia relativa de dosis a 5mm (%)
Dosis a 5 mm (Gy)	1º	12,5	12,9	0,35	3
Dosis a 5 mm (Gy)					
			1º		
180º		11,89			

6 Bibliografía

- [1] *Radioterapia para el cáncer*. (2017, August 11). Instituto Nacional del Cáncer. <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/tratamiento/tipos/radioterapia>
- [2] Rovira, I. M. (Ed.). (18 de Julio del 2008). Diseño y optimización del aplicador de un acelerador tipo microtrón para radioterapia intraoperatoria.
- [3] (N.d.). Womed.net. Retrieved February 22, 2023, from https://www.womed.net/fileadmin/womed/user_uploads/Images/WOmed_ioRT-50_English.pdf
- [4] *ioRT-50 - Sistema de radioterapia peroperatoria rayos X by BEBIG Medical*. (n.d.). Medicaexpo.es. Retrieved February 22, 2023, from <https://www.medicaexpo.es/prod/bebig-medical/product-126729-921035.html>
- [5] Perfil, V. T. mi. (n.d.). *Radiología para novatos*. Blogspot.com. Retrieved February 22, 2023, from <http://radiologiaparanovatos.blogspot.com/2016/03/t6-tubo-de-rayos-x.html>
- [6] Abdullah Abudra'A. Development of new dosimetric standards for low energy X-rays (≤ 50 keV) used in contact radiotherapy. Nuclear Experiment [nucl-ex]. Université Paris-Saclay, 2017. English. Ff NNT :2017SACLS489ff. fftel-01756399v1ff
- [7] Temprano, Á. E. (s/f). *Dosimetría relativa de campos de electrones para un acelerador de uso clínico*. Ugr.es. Recuperado el 20 de mayo de 2023, de https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/79054/TFM_AngelaEstebanTemprano.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [8] Vicente, D., & Pascual, G. (s/f). *CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA*. Csn.es. Recuperado el 20 de mayo de 2023, de <https://www.csn.es/documents/10182/950714/Curso+General+de+Formaci%C3%B3n+de+Actuantes+en+Emergencias+Nucleares.+TEMA+00.+Conceptos+b%C3%A1sicos+sobre+protecci%C3%B3n+radiol%C3%B3gica>
- [9] *Cáncer de mama*. (n.d.). Who.int. Retrieved February 22, 2023, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer>
- [10] CDCespanol. (2022, September 27). *¿Qué es el cáncer de mama?* Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/spanish/cancer/breast/basic_info/what-is-breast-cancer.htm
- [11] Sistema. (2023, January 24). *Cancer de mama - SEOM: Sociedad Española de Oncología Médica © 2019*. Seom.org. <https://seom.org/info-sobre-el-cancer/cancer-de-mama?start=9>
- [12] *Radiación intraoperatoria*. (n.d.). Breastcancer.org. Retrieved February 22, 2023, from <https://www.breastcancer.org/es/tratamiento/radioterapia/intraoperatoria>
- [13] *FAQs*. (n.d.). Nih.gov. Retrieved July 5, 2023, from <https://imagej.nih.gov/ij/docs/faqs.html>

