

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE FÍSICA

**DISEÑO, CÁLCULO, OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL BLINDAJE DE UN
RECINTO PARA MATERIALES RADIATIVOS EN DESUSO PARA EL CENTRO DE
INVESTIGACIÓN CON TÉCNICAS NUCLEARES (CITEN)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIATURA
EN FÍSICA

PRESENTADO POR:

REINA BEATRIZ RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

CÉDULA:

8-889-993

REALIZADO BAJO LA ASESORÍA:

DR. MARTÍN ACOSTA

CO-ASESOR:

MSC. ELADIO ÁBREGO

PANAMÁ, 2019

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE FÍSICA

**DISEÑO, CÁLCULO, OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL BLINDAJE DE UN
RECINTO PARA MATERIALES RADIATIVOS EN DESUSO PARA EL CENTRO DE
INVESTIGACIÓN CON TÉCNICAS NUCLEARES (CITEN)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIATURA
EN FÍSICA

PRESENTADO POR:
REINA BEATRIZ RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ
CÉDULA: 8-889-993

FIRMAS DEL JURADO CALIFICADOR:

X

Dr. Martín Acosta
Asesor

X

MSc. Eladio Ábrego
Co-Asesor

X

MSc. Nuriel Correa
Jurado

A Reina Rodríguez y Osvaldo Rodríguez, mis padres...

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a Dios todopoderoso, a quien le debo todo lo que tengo y lo que soy, porque me ha dado la vida y la salud para poder llegar hasta donde estoy.

A mi adorado ángel, mi madre, que nunca me abandona; siempre fue el motor que nos impulsó a ser personas de éxito.

A mis padres y hermanos, que siempre han estado presente, haciéndome sentir que no estoy sola y con ellos puedo contar para lo sea.

A mis grandes amigos, por todos esos momentos de alegría que hemos compartido, porque a lo largo de estos años hemos compartido y luchado mucho por alcanzar nuestras metas siempre apoyándonos incondicionalmente.

A mis asesores, por ayudarme a terminar esta etapa tan importante en mi vida y a los cuales estaré eternamente agradecida.

DISEÑO, CÁLCULO, OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL BLINDAJE DE UN RECINTO PARA MATERIALES RADIATIVOS EN DESUSO PARA EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CON TÉCNICAS NUCLEARES (CITEN)

RESUMEN

El presente estudio determinó un blindaje específico que contendrá una actividad máxima de $3,7 \times 10^{10} Bq$, por medio de una simulación que se realizó en el software de Matlab, para ello se tomaron en cuenta todas las condiciones posibles que establecen la autoridad competente nacional y las recomendaciones internacionales para garantizar que las personas ajenas reciban la dosis recomendada. El recinto estará ubicado en el campus de la Universidad de Panamá específicamente en el Centro de Investigación con Técnicas Nucleares.

Una vez se construya este depósito permitirá tener un control de los desechos radiactivos que son sólidos no compactable. Este estará soterrado con una tapa con el espesor necesario para cumplir con los límites de dosis y nivel ocupacional del área.

Se evaluaron diferentes tipos de materiales para encontrar el que mejor se adecuara a costo, efectividad y calidad. Los materiales estudiados fueron el plomo, concreto y acero, dándonos como resultado que el mejor material que cumple con las cualidades antes descrita es el concreto principalmente por el tema de la economía.

Como bien sabemos este recinto contara con una tapa de un espesor determinado mediante algoritmos además de un espesor especialmente diseñado a partir de la

optimación del blindaje. Es de suma importancia en la actualidad tener controlados los desechos radiactivos ya que son dañinos para las personas y el medio ambiente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PÁGINA	DE
TÍTULO.....	I
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE CUADROS	X
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XI
CAPÍTULO I	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Aspectos Generales.....	1
1.2. Antecedentes:	4
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
1.5. Antecedentes del CITEN.....	7
CAPÍTULO II	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Fenómeno de radiactividad.....	9
2.1.1. Actividad	9
2.1.2. Constante de decaimiento	10
2.2. Radiación ionizante.....	11
2.2.1. Descripción del campo de radiación	12
2.2.2. Interacción de los fotones con la materia	14
2.3. Dosis absorbida	17

2.3.1.	Kerma:	18
2.3.2.	Exposición	18
2.4.	Protección a las radiaciones	19
2.4.1.	Efecto de las radiaciones ionizantes sobre la materia biológica	19
2.4.2.	Magnitudes utilizadas en protección radiológica	20
2.4.3.	Magnitudes radiológicas de uso general	21
2.4.4.	Fundamentos de blindaje	24
2.4.5.	Formalismos de cálculos	24
2.4.6.	Materiales de blindaje	31
CAPÍTULO III		33
3.	MARCO METODOLÓGICO	34
3.1.	Descripción de la instalación.....	34
3.2.	Consideraciones generales del cálculo de blindaje	34
3.2.1.	Desarrollo de planos arquitectónicos	36
3.2.2.	Esquema de almacenamiento de desechos y áreas contiguas	37
3.3.	Diseño de programa computacional para cálculo de barrera.....	38
3.4.	Memoria de cálculo	38
CAPÍTULO IV		43
4.	RESULTADOS	44
4.1.	Modelo matemático de la dosis	44
4.2.	Modelización de la distribución de dosis en el plano	47
4.2.1.	Definición de los valores máximos de xy:	48
4.2.2.	Función de dosis.....	50
4.2.3.	Función de dosis detrás de la losa	50
4.2.4.	Análisis usando Matlab.....	52
4.3.	Optimización del blindaje	55
4.3.1.	Método sugerido para optimizar la función de dosis.....	56
4.3.2.	Método utilizado en la tesis	57
4.3.3.	Optimización por imágenes	57

4.3.4. Metodología	61
CAPÍTULO V	66
5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES.....	67
5.1. Conclusión	67
5.2. Recomendaciones	67
CÓDIGO FUENTE	69
ANÁLISIS DE BLINDAJE	69
ESQUEMA DEL BLINDAJE	75
FORMALISMO DE TRANSMISIÓN	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS	95

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro I Naturaleza y penetración de la radiación (BENINSON, 1995).....	11
Cuadro II. Descripción de las partículas neutras y cargadas (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011)	12
Cuadro III. Ventajas y desventajas de los materiales utilizados para blindaje (NCRP REPORT No. 151, 2005).....	32
Cuadro IV. Espesores decireductores.....	35
Cuadro V. Factor de ocupación.....	35
Cuadro VI. Algunos valores de dosis relativa y absoluta en puntos del plano de cálculo (losa) tomados de la curva de nivel.....	54

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Documento encontrado en el CITEN donde se detallan las fuentes con las que se contaba en un inicio	4
Ilustración 2. Regiones de dominio de los tres procesos principales de interacción (Vega 2009).....	14
Ilustración 3. Efecto fotoeléctrico. (Vega 2009).....	15
Ilustración 4. Ante la posibilidad de encontrarse con equipos de medida cuyos valores numéricos se expresan en unidades especiales, hoy obsoletas, se muestra el paso de ellas a las unidades del SI. Estas son obligatorias en la UE desde enero de 1986. (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).....	22
Ilustración 5. Relaciones entre las unidades SI que tienen nombre. En la primera columna se muestran los símbolos y los nombres de las unidades básicas y de algunas derivadas. En la tercera columna aparecen los símbolos de las unidades derivadas que tienen especiales. En la segunda columna pueden verse las unidades derivadas que carecen de nombre especial pero que se utilizan en la construcción de las unidades que tienen nombres especiales.. (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).....	23
Ilustración 6. Fuente radiactiva a cierta distancia (r) de un punto Q.....	26
Ilustración 7. Fuente radiactiva a cierta distancia (r) de un punto Q, separadas por un material blindante.	26
Ilustración 8. Ilustración 8. Planos del CITEN donde se llevará a cabo la construcción del depósito.	36
Ilustración 9. Punto 1 correspondiente al cálculo de espesor de material necesario para el recinto de desechos. Punto 2 correspondiente al punto para evaluar espesor del techo (losa) de concreto	37
Ilustración 10. Esquema de la ubicación de la fuente en el origen de coordenadas .	46
Ilustración 11. Definición de los valores máximos de x,y	48
Ilustración 12. Representación de la región donde se calculará la distribución de dosis generada por la fuente contenida en el recinto blindado	49

Ilustración 13. Grafica de superficie de la función de dosis en el plano definido después de la losa	53
Ilustración 14. Esquema que ilustra diversas distribuciones de dosis en el plano de la losa. Una persona de público siempre recibirá una dosis igual o menor que el límite de diseño $P/T = 8 \text{ mSv/año}$	55
Ilustración 15. Regiones de máxima y mínima dosis descritas en la función de distribución de dosis sobre el plano de la losa	58
Ilustración 16. Región de máxima dosis descritas en las curvas de nivel de la función de distribución de dosis sobre el plano de la losa	59
Ilustración 17. Región de dosis de la función de distribución de dosis; se pretende que esta región se optimice y disminuya en un $C(D) = 10\%$	61
Ilustración 18. En el programa de optimización por imágenes, se alimenta con los datos de la región y el valor optimización $C(D)$. Los resultados se obtienen una vez se oprime el botón de optimización.....	62
Ilustración 19. Esquema ilustrativo generado por el programa para dar una idea de la forma del blindaje optimizador. No toma en cuenta las escalas.....	63
Ilustración 20. Ilustración del proceso de optimización. La región escogida es de alta dosis y está definida en primera aproximación como un círculo.....	64
Ilustración 21. Ilustración del proceso de optimización. La región escogida de alta dosis (ilustración 20)) es optimizada generando el espesor y tamaño de la superficie de material blindante. Se coloca el blindaje sobre la tapa como se muestra en la imagen	65
Ilustración 22. Menú inicial donde nos muestra los botones que despliegan cada cálculo de nuestro programa	95
Ilustración 23. Cálculo de la optimización de la losa de nuestro depósito de fuentes radiactivas	95
Ilustración 24. Pantalla para el cálculo de blindaje donde se muestran paso a paso los datos que debemos ingresar al programa para obtener nuestro resultado. Punto rojo donde se coloca la fuente radiactiva, punto azul representa punto de cálculo para determinar el espesor que necesita nuestro blindaje, punto verde es el cálculo del	

techo se colocan los valores de factor de ocupación (T) y límite de diseño (P) para el cálculo de la losa y el punto rosado es para evaluar cualquier punto por encima de la losa..... 96

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos Generales

El fenómeno de radiactividad es aquel en el cual los elementos inestables que se encuentran en el ambiente emiten continuamente radiación ionizante en forma de partículas para cambiar de un estado de mayor energía a un estado más estable. También este proceso de emisión es conocido como desintegración radiactiva.

La radiactividad ha sido sin duda uno de los descubrimientos más importante en el desarrollo de las ciencias, dando miles de aportaciones a la humanidad en campos como la medicina, industria, agricultura e investigaciones científicas. Sin embargo, el uso de fuentes radiactivas posee un problema intrínseco, una vez dejen de ser útil se convierten en desechos radiactivos.

Asimismo, debemos tener claro términos como residuos radiactivos el cual se utiliza para referirse genéricamente a materiales conteniendo, o contaminados con, sustancias radiactivas en niveles tales de actividad que las dosis asociadas con su eliminación, superen los criterios de exención establecidos por la autoridad regulatoria nacional, y para el cual no se prevé ningún uso futuro. El manejo de este tipo de residuos debe efectuarse en forma segura, de acuerdo con los criterios de seguridad radiológica vigentes y principios generales de gestión.

Una de las etapas más importantes de la gestión de residuos radiactivos es su disposición definitiva (eliminación, evacuación, almacenamiento).

Por lo tanto, este proyecto consiste en diseñar y determinar el blindaje frente a la radiación de un lugar apto para depositar residuos radiactivos donde se puedan almacenar las fuentes en desuso o residuos radiactivos.

Esto tendrá lugar en la Universidad de Panamá específicamente en el CITEN (centro de investigaciones con técnicas nucleares). La idea nace debido a que se encontraron fuentes de radiación en el lugar. Algunas son desconocidas, unas con un blindaje que requiere mantenimiento y otras que están emitiendo radiación de baja intensidad. Todas estas fuentes deben recibir una gestión adecuada respetando las recomendaciones de seguridad frente a la radiación ionizante.

Debido a que el cálculo de blindaje de la estructura que se basa en una cantidad máxima de material almacenado y el mismo solo será alcanzado a largo plazo; una medición directa de los niveles de dosis alrededor del recinto no puede realizarse. Para solucionar este problema, a partir del diseño se realizará una simulación computacional para estudiar la distribución de la dosis en torno al blindaje, pero en zonas de mayor relevancia. La simulación matemática se realizará mediante el software MATLAB.

MATLAB, en su contenido básico, es un entorno integrado de trabajo que permite el análisis y la computación matemática interactiva de forma sencilla con más de 500 funciones matemáticas, estadísticas y técnicas implementadas, así como la visualización a través de todo tipo de gráficos de ingeniería y científicos. Este software está en continuo crecimiento y muy adaptable a los avances científicos para el

desarrollo de productos innovadores. Por otra parte, se busca utilizar materiales de bajo costo (C, 2003).

Como este proyecto se realizará en el lugar específico se puede decir que los espesores serán el resultado de un cálculo de blindaje personalizado (para una distribución específica de los desechos y las personas). También se tomará en cuenta que el recinto contará con una tapa con el espesor necesario para cumplir con los límites de dosis y nivel de ocupación del área.

Nuestro estudio será de gran utilidad para la Universidad de Panamá y puede ser utilizado posteriormente para hospitales y laboratorios para que una vez usen material radiactivo puedan desecharlo de manera adecuada sin dañar el medio ambiente y llevando así un control.

1.2. Antecedentes:

El CITEN es un centro de investigación que usa fuentes radiactivas y generadores que ha adquirido a lo largo del tiempo. Muchas de esas fuentes han dejado de ser útiles debido a que sobrepasaron el tiempo recomendado por los fabricantes de dichas fuentes. Todas esas fuentes se han convertido en desechos radiactivos.

Algunas de las fuentes son:



Isotopo	T 1/2	FACTOR	Maxima actividad
F-18	1,83 h	923	40 GBq
Na-22	2,61 a	855	40 GBq
P-32	13,01 d	885	40 GBq
K-42	12,29 d	815	100 GBq
Cs-51	22,7 d	945	4 GBq
Mn-54	312,16 d	955	400 GBq
Co-57	271,4 d	865	40 GBq
Co-58	70,8 d	786	25 GBq
Fe-59	44,52 d	957	40 GBq
Co-60	1925,28 a	885	40 GBq
Cs-64	12,70 h	816	250 GBq
Na-62	243,92 d	964	40 GBq
Ga-67	78,3 h	779	30 GBq
Ge-75	119,0 d	765	30 GBq
Sr-85	64,85 d	765	40 GBq
Sr-89	50,5 d	765	400 GBq
Mn-99	6,0 h	765	20 GBq
Tc-99m	6,0 h	765	20 GBq
In-113m	6,0 h	765	30 GBq
I-125	60,1 d	801	40 GBq
I-131	8,02 d	948	25 GBq
Xe-133	5,245 d	707	40 GBq
Ce-134	2,061 a	912	20 GBq
Ce-137	30,1 d	765	40 GBq
Ba-140	12,83 d	765	40 GBq
Yb-169	32,0 d	765	40 GBq
Lu-177	128 d	765	40 GBq
H-197	64,14 d	400	12 GBq
Au-198	2,695 d	944	40 GBq

Ilustración 1. Documento encontrado en el CITEN donde se detallas las fuentes con las que se contaba en un inicio

Los administradores del CITEN han contenido las fuentes radiactivas en sitios aislados y con la seguridad suficiente y es donde se encuentran ahora. La política para lo que se debe hacer con estas fuentes ha sido de contenerlas mientras se diseña un plan para un mejor almacenaje que cumplan con los requerimientos físicos, ingenieriles y administrativos.

1.3. Justificación

A nivel nacional e internacional toda fuente radiactiva ya sea en uso o en desuso debe estar inventariada y debidamente almacenada y ese almacenamiento depende del uso de la fuente. Si la fuente radiactiva tiene una utilidad específica ya sea en investigación, medicina, industria, agricultura, ese almacenaje es temporal, pero para fuentes en desuso el almacenamiento debe ser permanente. Como la Universidad de Panamá específicamente el CITEN tiene fuentes en desuso deben tener un almacenaje como se requiere que cumpla con todos los requisitos.

El trabajo de graduación busca diseñar, calcular y optimizar el blindaje necesario que requiere un almacenamiento seguro para que cumpla con la normativa nacional y las recomendaciones internacional para los límites seguros de las personas y el ambiente.

Además de que sea perdurable por un período mínimo de 30 años. Período suficiente para crear nuevas políticas para la gestión de dichas fuentes en desuso para cumplir con la seguridad de las personas y el ambiente entorno al almacenamiento. Es necesario la simulación computacional de dicho blindaje que contenga la carga completa para su evaluación y la optimización.

La justificación principal es aislar las fuentes radiactivas en desuso para que las autoridades desarrollen políticas sobre el almacenamiento de las mismas y este trabajo garantiza por su diseño al menos 30 años.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un recinto para el almacenamiento de las fuentes radiactivas en desuso ubicadas en el CITEN y realizar el cálculo de blindaje, desarrollando una simulación matemática del blindaje para un análisis de la distribución de dosis que permitan evaluar y optimizar.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Garantizar que la dosis recibida por el público, visitante del CITEN, este dentro de lo aceptado por la autoridad regulatoria nacional.
- Tomar en cuenta que los desechos radiactivos sean sólidos no compactables y la actividad total, en cualquier momento, no mayor de $3,7 \times 10^{10} Bq$.
- La energía de los fotones de rayos gamma emitidos por el conjunto de los desechos debe ser menor o igual que 0,662 MeV.
- Evaluar que el blindaje del recinto cumpla con el espesor necesario respetando los límites de dosis y el nivel de ocupación del área.
- Blindar para aislar las fuentes que se encuentran en el CITEN las cuales son: fuente de emisor Alfa, fuente de emisor Beta, Cesio 137, Americio 241 y tres desconocidos.
- Crear una memoria de cálculo del recinto y un inventario de fuentes con proyección a 30 años.

1.5. Antecedentes del CITEN

El CITEN se crea con base al artículo 41 de la ley 11 que reglamenta la Universidad de Panamá. Al CITEN se adscribe a la unidad de isotopos radiactivos que fue creada por la Asamblea Nacional mediante la Ley número 97 del 9 de diciembre de 1960.

Los objetivos y funciones iniciales principalmente eran:

- Promover y desarrollar investigaciones interdisciplinarias utilizando técnicas nucleares dentro de la Universidad de Panamá con Instituciones oficiales, así como también con empresas privadas.
- Difundir las técnicas nucleares a través de cursos, seminarios, adiestramientos, programas de intercambio científico y publicaciones.
- Cuidar y velar porque los radionúclidos se usen y desechen de acuerdo con las Normas Internacionales vigentes.
- Promover el establecimiento de Normas Nacionales para la manifestación y desechos de radionúclidos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fenómeno de radiactividad

El término radiactividad se refiere a aquellas transformaciones espontáneas que involucran cambios en el núcleo de los átomos. La energía liberada en esas transformaciones se emite en forma de varios tipos de radiación, tanto ionizante (fotones, electrones, etc.) como no ionizante (neutrinos). Todo el átomo se ve involucrado en él ya que las transformaciones nucleares pueden afectar también a la estructura electrónica del átomo y provocar la emisión de radiación fluorescente (Fernández-Varea).

En otras palabras, el fenómeno de la radiactividad es aquel en el cual los elementos inestables que se encuentran en el ambiente emiten continuamente partículas que cambian tanto el estado de la naturaleza como el núcleo de los átomos.

2.1.1. Actividad

La actividad se representada por la magnitud A y corresponde al número o a una cantidad de un radionúclido en un estado determinado de energía, en un tiempo dado, definida por la expresión (ICRP, Publicación 103, 2007):

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} \quad (1)$$

Donde dN es el número de transformaciones nucleares espontáneas a partir de ese estado determinado de energía, en el intervalo de tiempo dt .

En la actualidad la unidad para representar según el SI esta magnitud, es la inversa de segundo s^{-1} , que recibe el nombre de Becquerel. (Bq). Antes la unidad utilizada era el Curie (Ci) quedando hoy en día obsoleta (ICRP, Publicación 103, 2007).

2.1.2. Constante de decaimiento

Si consideramos una muestra formada por átomos de un elemento radiactivo, en instantes de tiempo estadísticamente al azar se producirán desintegraciones radiactivas.

Esto ocurrirá con una probabilidad, que es propia del nucleído considerado. Se define entonces una constante de decaimiento, que es la probabilidad de que un núcleo se desintegre en la unidad de tiempo. Se representa por la letra λ y su unidad es una inversa del tiempo (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).

Con el pasar de los tiempos se han dado grandes aportes como el de Becquerel, Pierre y María Curie y Rutherford entre 1896 y 1907. Este trabajo nos permite hoy en día clasificar según su poder de penetración como se muestra en la Cuadro 1 (BENINSON, 1995).

El poder de la penetración de la radiación va desde aquel que puede ser bloqueado por una hoja de papel, llamados rayos α , está compuesta por un núcleo de Helio. Las partículas Beta, compuesta por electrones de origen nuclear, es detenida por una hoja de papel de aluminio y las partículas y la radiación Gamma es absorbida cuando penetra en un material denso (BENINSON, 1995).

Interesa la penetración de la radiación en la materia fundamentalmente por dos motivos, primero, porque cuando la radiación es frenada se produce una conversión de la energía de la radiación en energía térmica y, segundo, porque la radiación es dañina para los sistemas biológicos y es necesario conocer cómo protegerlos de las fuentes de radiación (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).

Radiación	Naturaleza	Carga	Penetración en aire	Penetración en sólido
α	Núcleo de helio (2 protones y 2 neutrones)	+2 e	centímetros	micrómetros
β	electrón	-1e	metros	milímetros
σ	Radiación electromagnética	0	100 metros	centímetros/ metros

Cuadro I Naturaleza y penetración de la radiación (BENINSON, 1995)

2.2. Radiación ionizante

Se denominan radiaciones ionizantes aquellas que son capaces de liberar electrones ligados en orbitales atómicos o moleculares, para lo que se requieren energías superiores a unos 10 eV. En el caso de electrones, positrones y fotones nos limitaremos a tratar energías entre decenas de eV y centenares de MeV, mientras que para partículas cargadas pesadas consideraremos energías específicas comprendidas entre decenas de keV y centenares de MeV. Estos intervalos cubren holgadamente las energías empleadas en física médica, así como las de interés en Protección Radiológica (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).

Este tipo de radiación se compone de ondas electromagnéticas de frecuencias muy altas o partículas moviéndose a gran rapidez, con energía capaz de ionizar átomos o moléculas y romper enlaces atómicos que mantienen unidas a las moléculas en las células produciendo daño biológico en los seres vivos. Esta tiene propiedades penetrantes, por ello es importante su estudio en el caso de las aplicaciones de la radiación en medicina (Vega, 2009).

Las radiaciones ionizantes se clasifican teniendo en cuenta en primer lugar a la carga eléctrica de las partículas (neutras o cargadas). La segunda característica relevante es la masa de las mismas (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).

Partículas neutras	Fotones	Rayos x, rayos γ
	Neutrones	
Partículas cargadas	Ligeras	$(M=m_e) e^- , e^+$
	Pesadas	iones ligeros, H, ...Ne iones pesados Na, ...fragmentos de fisión "exóticas" , $\mu^\pm, \pi^\pm, \bar{p}, \dots$

Cuadro II. Descripción de las partículas neutras y cargadas (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011)

2.2.1. Descripción del campo de radiación

El campo de radiación describe el comportamiento de las partículas en el espacio libre.

Es importante conocer esta magnitud ya que permite el estudio de las partículas en términos de número de partículas, energía que transportan y su variación en el tiempo.

Para una región en el espacio definida por una esfera S de radio r en torno a un punto P, el número N de partículas que atraviesan dicha región pueden ser descritas por (ICRP, Publicación 103, 2007):

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (2)$$

Donde Φ se conoce como fluencia de partículas.

Como el campo de radiación transporta energía, la descripción de la distribución energética esta descrita por (ICRP, Publicación 103, 2007):

$$\Psi = \frac{dR}{da} \quad (3)$$

Donde R es la energía que transporta las partículas y Ψ es la fluencia de energía.

Cuando una fuente de radiación irradia, crea un campo de radiación heterogéneo debido a que la energía que compone ese haz está compuesta por partículas que transportan diferentes cantidades de energía. Al describir dicho campo con Ψ permite “clasificar” las partículas en función de su energía creando así un espectro de energía. Conocer el número de partículas y su energía antes de la interacción es importante ya que juega un papel fundamental en la disposición final de esa energía en el material irradiado y en la determinación de la dosis absorbida en el medio.

La importancia relativa de los diversos procesos depende fundamentalmente de la energía de la radiación incidente, aunque también es muy importante el material con el que se produce la interacción. La ilustración 1 muestra la importancia relativa de estos procesos en función de la energía de los rayos gamma y del número atómico del absorbente.

En general se pueden establecer intervalos aproximados de energías de modo que en cada uno de ellos unos procesos dominan sobre otros. A energías del fotón incidente superiores a 1,0 MeV el proceso dominante es la producción de pares. A energías del orden de 1,0 MeV domina el efecto Compton; mientras que, a energías menores que

1,0 MeV los procesos dominantes son el Efecto Fotoeléctrico y Rayleigh (ICRP, Publicación 103, 2007).

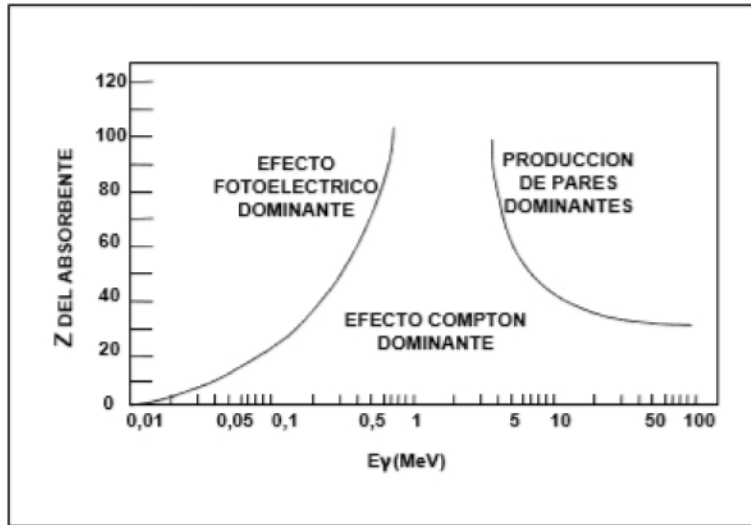


Ilustración 2. Regiones de dominio de los tres procesos principales de interacción (Vega 2009)

2.2.2. Interacción de los fotones con la materia

La interacción de los fotones con la materia se define con los siguientes principios:

- **Efecto fotoeléctrico:** Durante el efecto fotoeléctrico un fotón transmite toda su energía cinética a un electrón atómico interno del material desprendiéndolo en forma de fotoelectrón. Después de que esto sucede, los electrones de las capas exteriores buscan llenar la vacante, creando un exceso de energía que es disipada por la emisión de radiación característica y/o por electrones de baja energía (electrones Auger). Estos son electrones de baja energía arrancados del átomo por el fotón producido en el reajuste electrónico que sigue a la emisión fotoeléctrica (Vega, 2009).

Para que esta interacción ocurra el fotón incidente debe tener una energía ($h\nu$) mayor que la energía de enlace del electrón.

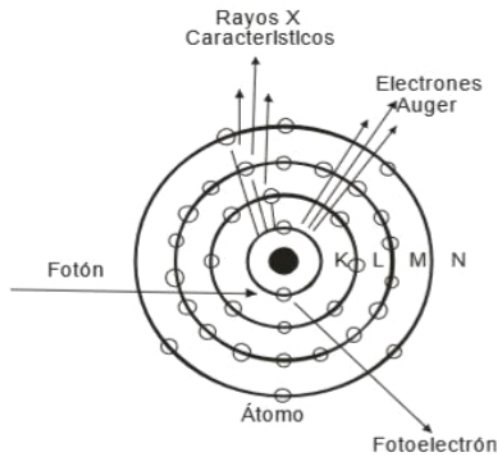


Ilustración 3. Efecto fotoeléctrico. (Vega 2009)

La probabilidad de ocurrencia de la absorción fotoeléctrica depende del número atómico del material irradiado y de la energía del fotón incidente; específicamente es proporcional a Z^3 e inversamente proporcional a $(h\nu)$.

- **Dispersión Compton:** A medida que la energía de la radiación incidente aumenta, su longitud de onda decrece y hay una mayor tendencia a interactuar con los electrones individuales y no con el átomo en su conjunto como en el caso del efecto fotoeléctrico. Los fotones muy energéticos “ven” a los electrones orbitales exteriores, débilmente ligados, prácticamente como partículas libres y la interacción puede considerarse como una colisión elástica entre un fotón y un electrón libre. Por lo explicado anteriormente, el fotón no puede absorberse totalmente existiendo, por lo tanto, un fotón dispersado que se mueve en

dirección distinta a la del fotón original con una energía y una cantidad de movimiento también diferentes. La conservación de estas magnitudes para el sistema en su conjunto la garantiza el electrón que dispersa el fotón retrocediendo con la velocidad y en la dirección apropiadas (BENINSON, 1995). Este proceso, conocido como dispersión Compton, constituye el mecanismo de absorción más importante para radiación y con energías entre los 0,5 y los 10 MeV. Una característica destacada del mismo es que la radiación difundida tiene una longitud de onda que depende del ángulo de difusión y que es mayor que la del haz incidente (BENINSON, 1995).

- **Producción de pares:** El fotón interactúa con el campo electromagnético del núcleo y cede toda su energía en el proceso creando un par electrón - positrón. Para que suceda este proceso de interacción es necesario que la energía mínima del fotón incidente sea de 1,022 MeV (umbral), ya que la energía másica en reposo del electrón es equivalente a 0,511 MeV al igual que del positrón (Yanchapanta, 2013).

La creación de pares está estrechamente ligada con la aniquilación electrón-positrón. Cuando este último es creado va perdiendo velocidad por colisiones sucesivas con los átomos hasta quedar prácticamente en reposo. En ese momento puede interactuar con un electrón que se encuentra en el mismo estado desapareciendo ambas partículas y dando lugar a dos fotones, cada uno de 0,511 MeV, que se mueven en direcciones opuestas. Esta radiación

secundaria, llamada radiación de aniquilamiento, acompaña normalmente la absorción de rayos gamma por la materia (BENINSON, 1995).

- **Dispersión Thompson-Rayleigh:** Ocurre principalmente con rayos X de muy baja energía, como las usadas en mamografía (15 a 30 keV). Durante este fenómeno, el fotón no pierde energía debido a que estos fotones son dispersados elásticamente por electrones atómicos fuertemente ligados, sin excitar el átomo y el ángulo es relativamente pequeño, por lo tanto, como no hay transferencia de energética al medio, su interés en el caso es despreciable (Yanchapanta, 2013).

2.3. Dosis absorbida

La dosis absorbida es el cociente entre $d\bar{\epsilon}$ y dm , donde $d\bar{\epsilon}$ es la energía impartida media por la radiación ionizante a una masa dm de materia (Vega, 2009).

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (4)$$

La energía impartida $\bar{\epsilon}$ representa la energía total depositada en el volumen de materia considerado, (Vega, 2009) es decir:

$$\bar{\epsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q \quad (5)$$

R_{in} = energía de las partículas (tanto cargadas como no cargadas) entrantes en el volumen considerado.

R_{out} = energía de las partículas (tanto cargadas como no cargadas) salientes del volumen considerado.

$\sum Q$ = suma de los cambios en las energías en reposo de los núcleos atómicos y de

todas las partículas implicadas en las interacciones.

La unidad de dosis absorbida en el Sistema Internacional (SI) es el joule/kg (J/kg ó J.kg⁻¹) que recibe el nombre de gray (Gy) (Vega, 2009).

2.3.1. Kerma:

El término KERMA corresponde a las siglas en inglés de “Kinetic Energy Released in matter” (energía cinética liberada en un material absorbente). Esta magnitud se introdujo por primera vez en 1962 para tener en cuenta de forma explícita las dos etapas del proceso mediante el cual las partículas sin carga (fotones y neutrones) depositan su energía en la materia que atraviesan. Dichas partículas interactúan y transfieren parte de su energía cinética a partículas cargadas (principalmente electrones) que depositan su energía mediante colisiones (ionización y excitación) de átomos o la pierden de forma continua mediante radiación de frenado (ICRU, 1980).

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (6)$$

dE_{tr} = es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, liberadas por partículas sin carga en una masa dm de material.

El nombre especial de esta magnitud es el gray (Gy) al igual que para la dosis absorbida.

2.3.2. Exposición

La magnitud exposición X , se define como el cociente dQ/dm donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos

los electrones son liberados por fotones, en un volumen elemental de aire cuya masa es dm , son completamente frenados en aire (ICRU, 1980).

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (7)$$

La unidad utilizada anteriormente era el Roentgen (R), hoy en día la que se usa es (C/kg).

2.4. Protección a las radiaciones

2.4.1. Efecto de las radiaciones ionizantes sobre la materia biológica

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son la consecuencia de un número importante de fenómenos desencadenados por el pasaje de radiación a través de un medio. El proceso de ionización supone necesariamente cambios en átomos y moléculas, aunque sólo sea en forma transitoria, que a veces puede dañar a las células. Si se producen daños celulares y no se reparan adecuadamente, puede ocurrir que las células afectadas mueran o se vea impedida su reproducción, o bien que se origine una célula viable, pero modificada (ICRP, Publication 26, 1977).

La mayoría de los efectos adversos para la salud por exposición a la radiación pueden agruparse en dos categorías generales:

- **Efectos Estocásticos:** es decir, cáncer y efectos heredables implicando, bien el desarrollo de cáncer en los individuos expuestos debido a la mutación de células somáticas o una enfermedad heredable en su progenie debido a la mutación en células reproductoras (germinales) (ICRP, Publicación 103, 2007).

Los efectos estocásticos son aquellos en los cuales la probabilidad de que se produzca el efecto es función de la dosis, mientras que la severidad del mismo es independiente de la dosis, y no tienen umbral (ICRP, Publication 26, 1977).

- **Efectos deterministas:** son los daños en poblaciones de células, caracterizado por una dosis umbral y un aumento en la severidad de la reacción a medida que aumenta la dosis. También denominados reacciones tisulares. En algunos casos, los efectos deterministas se pueden modificar por procedimientos posteriores a la irradiación, incluyendo modificadores de la respuesta biológica (ICRP, Publicación 103, 2007).

2.4.2. Magnitudes utilizadas en protección radiológica

Estas magnitudes toman en cuenta el tipo y energía de la radiación incidente sobre el cuerpo humano, así como la radiosensibilidad de los diferentes órganos y tejidos. (Corral, 2015)

- **Dosis equivalente:** Esta magnitud se ha definido como el daño biológico producido a un órgano, inducido por un tipo de radiación y energía determinada. Se representa por la siguiente ecuación (Corral, 2015):

$$H = W_R D_{T,R} \quad (8)$$

Aquí, $D_{T,R}$ es la dosis absorbida promedio en el órgano o tejido debido a la radiación R. Por otro lado, W_R es el factor de ponderación que califica la capacidad de daño de las diferentes clases de radiación y se selecciona en función del tipo y energía de la radiación R incidente sobre el órgano o tejido.

La unidad de la dosis equivalente es el Sievert (Sv).

- **Dosis efectiva:** Esta magnitud relaciona la probabilidad de la aparición de efectos estocásticos debido a la dosis equivalente, y depende del órgano o tejido irradiado. Por lo tanto, se define como la suma de las dosis equivalentes recibidas por cada órgano o tejido del cuerpo, dada por un factor de ponderación por tejido (Q_T), el cual representa la contribución relativa de ese órgano o tejido al detrimento total resultante de la irradiación uniforme en todo el cuerpo (Corral, 2015).

$$E = \sum W_T H_T = \sum W_T W_R D_{T,R} \quad (9)$$

La unidad para esta magnitud está dada por las mismas unidades que representa la dosis equivalente (Corral, 2015).

2.4.3. Magnitudes radiológicas de uso general

En 1962 ICRU animó a utilizar el nuevo sistema mientras retenía de forma temporal las unidades especiales rad, roentgen y Curie, aunque se preveía abandonarlas en 1985, después de un período de transición. Para facilitar el uso del sistema SI, ICRU recomendó en 1974 la adopción de nombres especiales para dos de las unidades en el nuevo sistema (Gray para el Joule por kilogramo y Becquerel para el recíproco del segundo). Fueron adoptadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas en 1975. En el campo de la protección radiológica el ICRU y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) propusieron conjuntamente, en 1977, el nombre especial de Sievert para la unidad de la magnitud básica en Protección Radiológica, de símbolo H, que había sido establecida, también conjuntamente por ambas

Comisiones, en 1962. Fue adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas en 1979 (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).

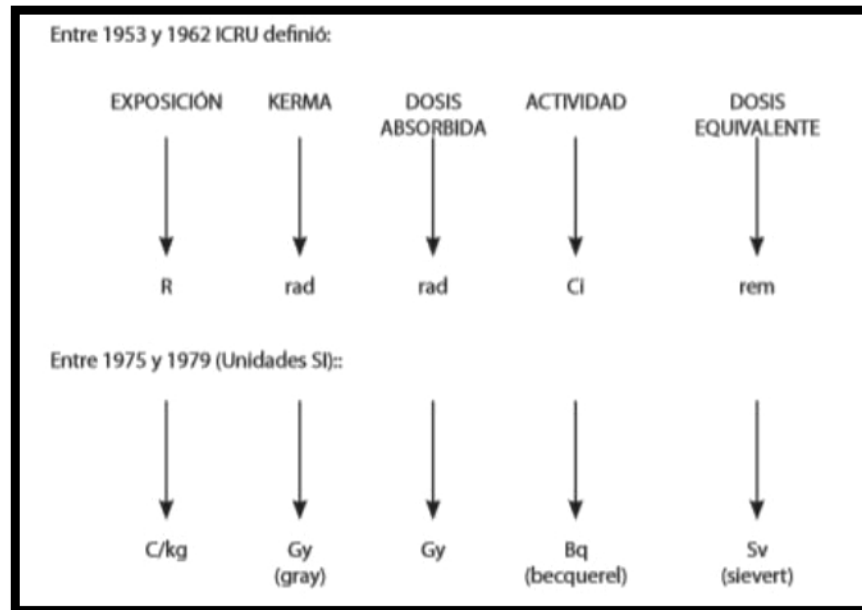


Ilustración 4. Ante la posibilidad de encontrarse con equipos de medida cuyos valores numéricos se expresan en unidades especiales, hoy obsoletas, se muestra el paso de ellas a las unidades del SI. Estas son obligatorias en la UE desde enero de 1986. (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011)

ICRU recomendó que a partir de 1985 se abandonaran las unidades especiales röntgen, rad, rem y curio. La legislación europea prescribe que desde el 1 de enero de 1986 se utilicen en el campo de las radiaciones ionizantes las unidades SI.

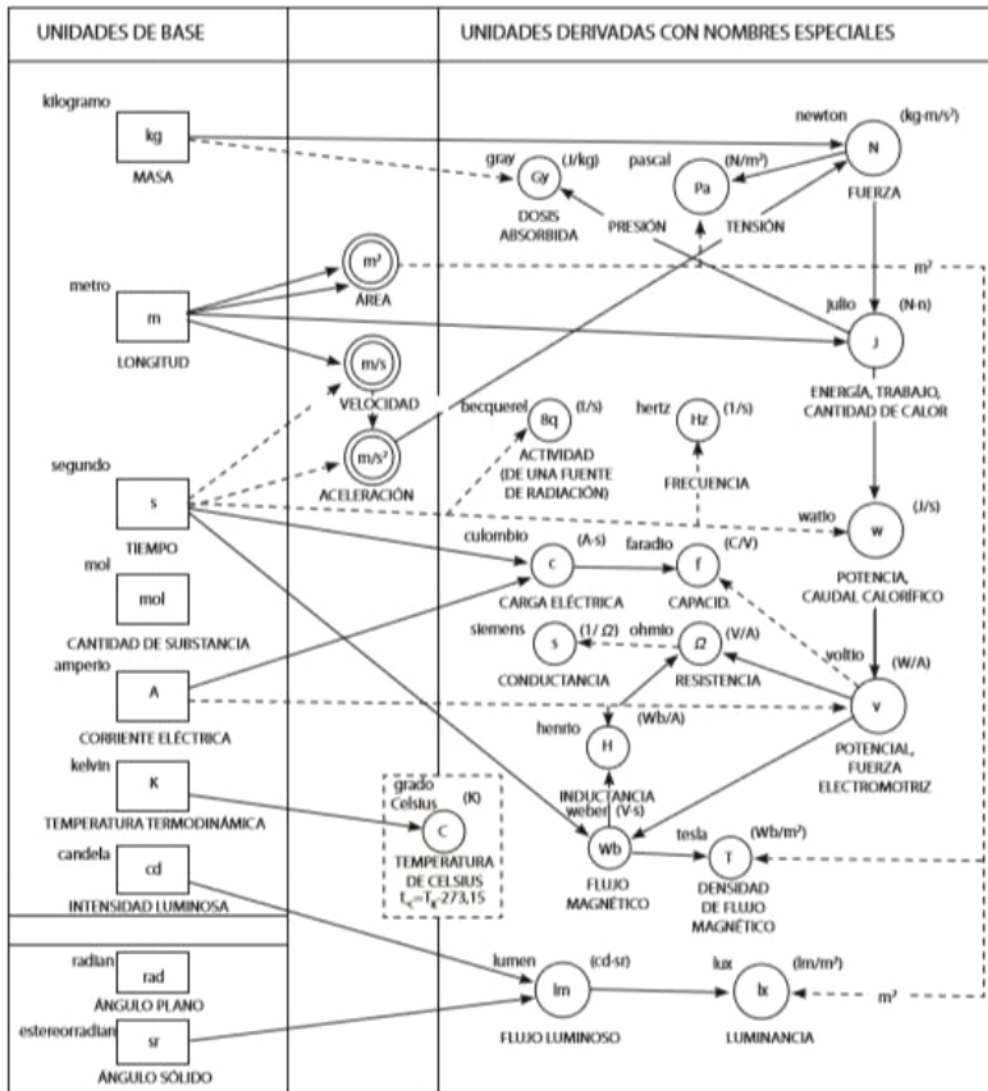


Ilustración 5. Relaciones entre las unidades SI que tienen nombre. En la primera columna se muestran los símbolos y los nombres de las unidades básicas y de algunas derivadas. En la tercera columna aparecen los símbolos de las unidades derivadas que tienen especiales. En la segunda columna pueden verse las unidades derivadas que carecen de nombre especial pero que se utilizan en la construcción de las unidades que tienen nombres especiales.. (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011)

Uno de los métodos para controlar la exposición a las radiaciones ionizantes es el empleo de blindajes o barreras de protección de materiales adecuados entre la fuente de radiación y las personas para reducir la intensidad de estas a los niveles permisibles recomendados por la OIEA (Yanchapanta, 2013).

2.4.4. Fundamentos de blindaje

No existe normativa específica acerca de los cálculos de blindaje. La autoridad competente nacional recomienda que se utilice los protocolos y formalismos dados por el OIEA, ICRP, ICRU, NCRP, para los límites de dosis a nivel nacional ya sea para el personal ocupacionalmente expuesto, público y el ambiente se utilizan los límites en dosis efectiva descritos por el ICRP (1991) que establecen 20 mSv por año para el personal y 1,0 mSv para el público.

2.4.5. Formalismos de cálculos

Los cálculos necesarios para determina el nivel de blindaje para reducir los niveles de dosis en torno a una fuente radiactiva lo suficiente para cumplir con las regulaciones locales se basan en formalismos de cálculo. Estos formalismos son desarrollados por diversas organizaciones especializadas en protección radiológica y física médica.

Los formalismos de cálculo buscan estandarizar la forma en que se realizan los cálculos, eliminar las sobreestimaciones de materiales y desarrollar una herramienta que se adapte en el tiempo a medida que la tecnología avanza.

Un formalismo de cálculo está fuertemente ligado a la práctica que utiliza una fuente particular. Esto se debe a que las aplicaciones de las fuentes son distintas inclusive en el mismo campo donde se usan. Un ejemplo claro es en medicina donde los

requerimientos para blindar un generador de rayos X de uso diagnóstico es diferente para un generador de rayos x para terapia. La diferencia radica en que los rayos X diagnósticos son de baja energía mientras que los de terapia son de alta energía. De allí que se requieran dos formalismos diferentes de cálculo para determinar los blindajes; uno para diagnóstico y otro para terapia.

Para fuentes radiactivas existen formalismo basado en atenuación del haz y formalismos basados en transmitancia del haz.

El formalismo de cálculo basado en la atenuación del haz indica que la cantidad de radiación que es removida del haz primario debida a las interacciones con el material es una función exponencial decreciente. Es muy útil para haces estrechos y espectros de comportamiento monoenergéticos, para haces anchos es necesario un ajuste por la contribución de los fotones dispersos desde la barrera al punto de cálculo. Este ajuste se realiza multiplicando la función de atenuación por una función de acumulación o "buildup". La complicación en ese formalismo radica en que la función de acumulación depende del espesor del material blindante. Las soluciones de las ecuaciones no son cerradas y requieren de aproximaciones por métodos iterativos.

El formalismo de cálculo basado en la transmitancia se basa en determinar cuanta radiación se transmite cuando un material de blindaje es irradiado por el haz primario. Al conocer esta cantidad, se puede relacionar con un número específicos de capas de ese material lo suficiente para un blindaje adecuado. Este formalismo es el utilizado en esta tesis.

➤ **Formalismo de cálculo basado en capas reductoras**

Imaginemos una fuente radiactiva S que irradia isotrópicamente en todas direcciones. En un punto Q que se encuentra a una distancia r de la fuente se determina la tasa de dosis $H(0)$ (ilustración 6).

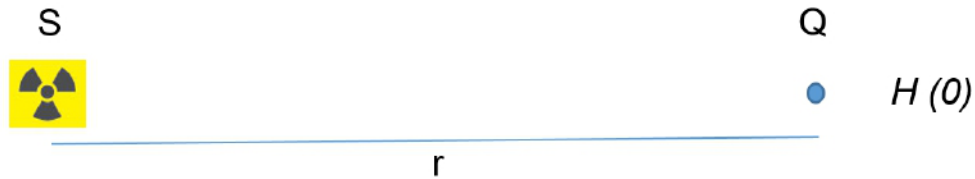


Ilustración 6. Fuente radiactiva a cierta distancia (r) de un punto Q

Si se interpone un material blindante de cierto espesor x entre la fuente y el punto, la tasa de dosis $H(0)$ se verá disminuido debido a que la fluencia de energía se ve modificada por el material agregado. Esta tasa de dosis se denominará $H(x)$ (ver ilustración 7).

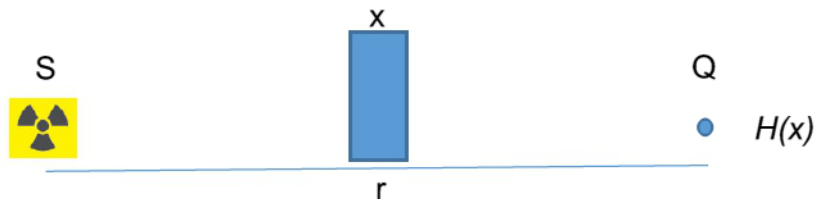


Ilustración 7. Fuente radiactiva a cierta distancia (r) de un punto Q, separadas por un material blindante.

Se define la transmisión a la función B definida como el cociente entre la dosis con blindaje entre la dosis sin blindaje evaluadas en Q.

$$B(x) = \frac{H(x)}{H(0)} \quad (10)$$

Esta función es válida para fuentes radiactivas o generadores de radiación.

El formalismo no establece la forma de $H(0)$ debido a que esta cantidad está representada por una función de dosis que depende de las características de la fuente.

La forma en que se calcula debe establecerla el especialista que aplica el formalismo.

El formalismo indica que la transmisión está relacionada un número de capas decirreductoras del material blindante. Este número (n) de capas interpuestas entre la fuente y el punto es suficiente para que en Q la dosis disminuya a los niveles adecuados.

La capa decirreductora o TVL es la cantidad de material necesario para absorber el 90% de toda la radiación, es decir, para reducirlo a una décima parte de la intensidad original. Se define n entonces como:

$$n = -\log_{10} B = \frac{x}{TVL} \quad (11)$$

El espesor necesario para lograr que en Q se alcance una tasa de dosis $H(x)$ está dado por:

$$x = n TVL \quad (12)$$

➤ **Cambio por el endurecimiento del haz:** cuando el haz atraviesa el material blindante, los fotones de menor energía son removidos por la atenuación haciendo un haz menos intenso, pero más endurecido, es decir, más penetrante. Este cambio en el espectro debe ser corregido para haces de alta energía (mayores a 500 keV) es por esto que el formalismo redefine n como:

$$n = 1 + \frac{x - TVL_1}{TVL_e} \quad (13)$$

Donde TVL_1 es la primera capa deirreductora y TVL_e es la capa deirreductora de equilibrio. La TVL_e se entiende como el TVL umbral donde ya no hay cambios en la intensidad. Para baja energía, $TVL_1 \rightarrow TVL_e$ entonces $n=x/TVL$.

➤ **Límites de diseño:** uno de los principios de la protección radiológica es el limitar la dosis con el fin de mantener los niveles de radiación para evitar los efectos determinísticos y reducir la probabilidad de los efectos estocásticos. Existe un límite que los países incorporan en sus legislaciones y que cualquier práctica que utilice radiaciones ionizantes deben respetar dichos límites. Los límites establecidos por las naciones siempre están en términos de dosis efectiva, E. Existen dos límites establecido por la legislación nacional, el que está asociado a las personas que por sus labores o trabajos se ven expuestos a niveles de radiación distintos a cualquier otro trabajador. Este límite lo denominaremos límite ocupacional. El valor establecido es 20 mSv/año. El otro límite es el del público y el ambiente. Este se basa en el hecho de que no existe ningún mecanismo para eliminar en su totalidad la radiación emitida por una fuente. Su valor es de 1 mSv/año.

Los límites de diseño se entienden como el límite de dosis tal que un blindaje cumpla con esta máxima:

$$\text{Límite de diseño} \leq \text{Límite de dosis nacional}$$

Para la tesis se estableció que el límite de diseño y el límite de dosis nacional (ocupacional y público) son iguales.

➤ **Factor de ocupación (T):** se entiende que la ocupación de un lugar o el entorno a una fuente no es permanente, es decir, en una práctica normal lo máximo que un

personal ocupacionalmente expuesto está trabajando con una fuente de radiación son 8 horas. Se dice que es una ocupación total. En los casos de un pasillo continuo a la fuente donde transitan personas, por la brevedad de la ocupación se dice que es de baja ocupación. A partir de estos conceptos se establece el factor de ocupación, T, que indica el nivel de ocupación de un área en torno al blindaje de la fuente. Los valores están establecidos para diferentes áreas y varían como:

$$1 \leq T < 0$$

Este factor es importante porque el espesor de blindaje con una ocupación baja siempre es menor que un área de ocupación total. Por esta razón las definiciones de las categorías de las áreas deben estar identificadas antes de aplicar el formalismo de cálculo.

➤ **Formalismo de cálculo basados en las capas decirreductoras:** se define en Q que la dosis mínima que debe existir en ese punto está dada por:

$$\text{Dosis mínima de blindaje} = \frac{P}{T} \quad (14)$$

Donde P es el límite de diseño y T el factor de ocupación. La transmisión B se define

como

$$B = \frac{P/T}{H(0)} \quad (15)$$

Donde $H(0)$ es la dosis en Q (*Figura 6*) si no hubiese un material blindante entre la fuente y el punto (*figura*). La forma de $H(0)$ está dada por la tasa de dosis generada por la fuente S que consideraremos de naturaleza radiactiva y con una actividad A.

$$H(0) = \Gamma \frac{A}{r^2} \cdot \text{factor} \quad (16)$$

Donde:

- Γ es la constante específica Gamma.
- A es la actividad de la fuente.
- r es la distancia de la fuente al punto de cálculo.
- factor es un conjunto de factores de conversión.

La constante específica Gamma está definida como la tasa de Kerma que generaría una fuente con una actividad de un megabequerelio (1 MBq) a la distancia de un metro. La tasa de Kerma está en unidades de Gy/h (Brosed, Fundamentos de Física Médica, 2011).

➤ **Factores de conversión:** es importante tener en cuenta que la dosis especificada por la legislación nacional siempre está en términos de dosis efectiva, una cantidad que por definición es difícil de determinar fuera de un laboratorio (ICRP 60, 1991). Es por esta razón que se recurre a un proceso que permite mediante la medición o cálculo de una magnitud operacional acceder a la dosis efectiva. El proceso de llevar el Kerma a dosis efectiva se puede representar por el siguiente esquema:

$$\text{Kerma} \xrightarrow{\text{factor 1}} \text{Magnitud operacional} \xrightarrow{\text{factor 2}} \text{Dosis efectiva}$$

El factor 1 y el factor 2 son descritos en las publicaciones ICRP 74 y ICRP 116. El factor de conversión depende de la naturaleza de la radiación (fotones o partículas), de la energía que transportan y la geometría de irradiación.

La magnitud operacional utilizada depende de si evalúa individuos o el ambiente. En los casos ocupacional se utiliza la dosis equivalente personal $H_p(10)$ y para el ambiente o público se utiliza la dosis equivalente ambiental $H^*(10)$.

El factor de transformación que lleva el número de horas a año usualmente está definido en términos de la jornada laboral o de tránsito de áreas.

➤ **Metodología de cálculo:** el formalismo de cálculo de blindaje se puede resumir con los siguientes pasos:

Calcular la transmisión B utilizando el límite de diseño y determinando el correspondiente valor de la dosis sin blindaje $H(0)$.

Calcular el número de capas de circunreductoras, n .

Determinar el espesor de material blindante como $x = n \cdot TVL$ para baja energía o $x = TVL_1 + (1-n) \cdot TVL_e$ para alta energía.

2.4.6. Materiales de blindaje

Los materiales utilizados para blindar fuentes de radiación X y gamma tienen masa y número atómico alto, capaces de atenuar la radiación al grado requerido. Los más utilizados son: concreto, plomo, acero/ hierro por las siguientes características.

En nuestro caso nos enfocamos en buscar un bajo costo en el material el escogido es el concreto debemos tener en cuenta que tenga una alta densidad (densidad de hasta 4g/cm^3 , mientras que el hormigón normal es de aprox. 2.3)

Material	Ventaja	Desventaja
Plomo	Número atómico alto Alta densidad física (11,35 g/cm ³) Requiere espacios pequeños	Relativamente costoso Difícil de trabajar Pesadas
Hierro/acero	Densidad física relativamente alta Requiere espacio pequeño Fáciles de instalar Estructura autoportada	Relativamente costoso Relativamente pesado
Concreto	Barato Autoportado Fácil de manipular	Requiere espacios grandes Puede variar la densidad de una pared por lo tanto, es necesario controlar ese aspecto

Cuadro III. Ventajas y desventajas de los materiales utilizados para blindaje (NCRP REPORT No. 151, 2005)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Descripción de la instalación

El lugar de desechos radiactivos es un recinto soterrado con una tapa con el espesor necesario para cumplir con los límites de dosis y el nivel de ocupación del área. Posee profundidad es de 150 cm desde el nivel del suelo hasta la fuente y rodeado de tierra. Este recinto está ubicado en las instalaciones del Centro de Investigación con Técnicas Nucleares de la Universidad de Panamá.

3.2. Consideraciones generales del cálculo de blindaje

Las consideraciones para el cálculo son las siguientes:

- El radioisótopo utilizado es el Cesio 137 (^{137}Cs).
- La actividad máxima de contención es 37000 MBq (1Ci).
- Factor de tiempo (ft) para el recinto es 8400 hora/año.
- Factor de tiempo (ft) para el pasillo es 4500 hora/año.
- El límite (P) para zonas controladas es de 20 mSv/año. Para zonas no controladas (público) el límite es 1 mSv/año.
- La constante específica Gamma es $7,72 \times 10^{-5} \text{ mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.
- El factor de conversión $f_{c1} = H^*(10)/K_{\text{aire}} = 1,20 \text{ mSv/mGy}$.
- El factor de conversión $f_{c2} = E/H^*(10) = 0,84 \text{ mSv/mSv}$.
- La densidad del concreto ordinario es 2.300 g/cm^3 .

➤ Los espesores de cireductores utilizados se resumen en la siguiente tabla:

Material	TVL₁ (cm)	TVL_e (cm)
Plomo	2,31	2,05
Concreto	21,4	16,1
Acero	6,25	4,77

Cuadro IV. Espesores de cireductores

➤ Los factores de ocupación utilizados se resumen en la siguiente tabla:

Zona	Factor de ocupación
Entrada a pasillo	1/8
Área sin personal	1/40

Cuadro V. Factor de ocupación

3.2.1. Desarrollo de planos arquitectónicos

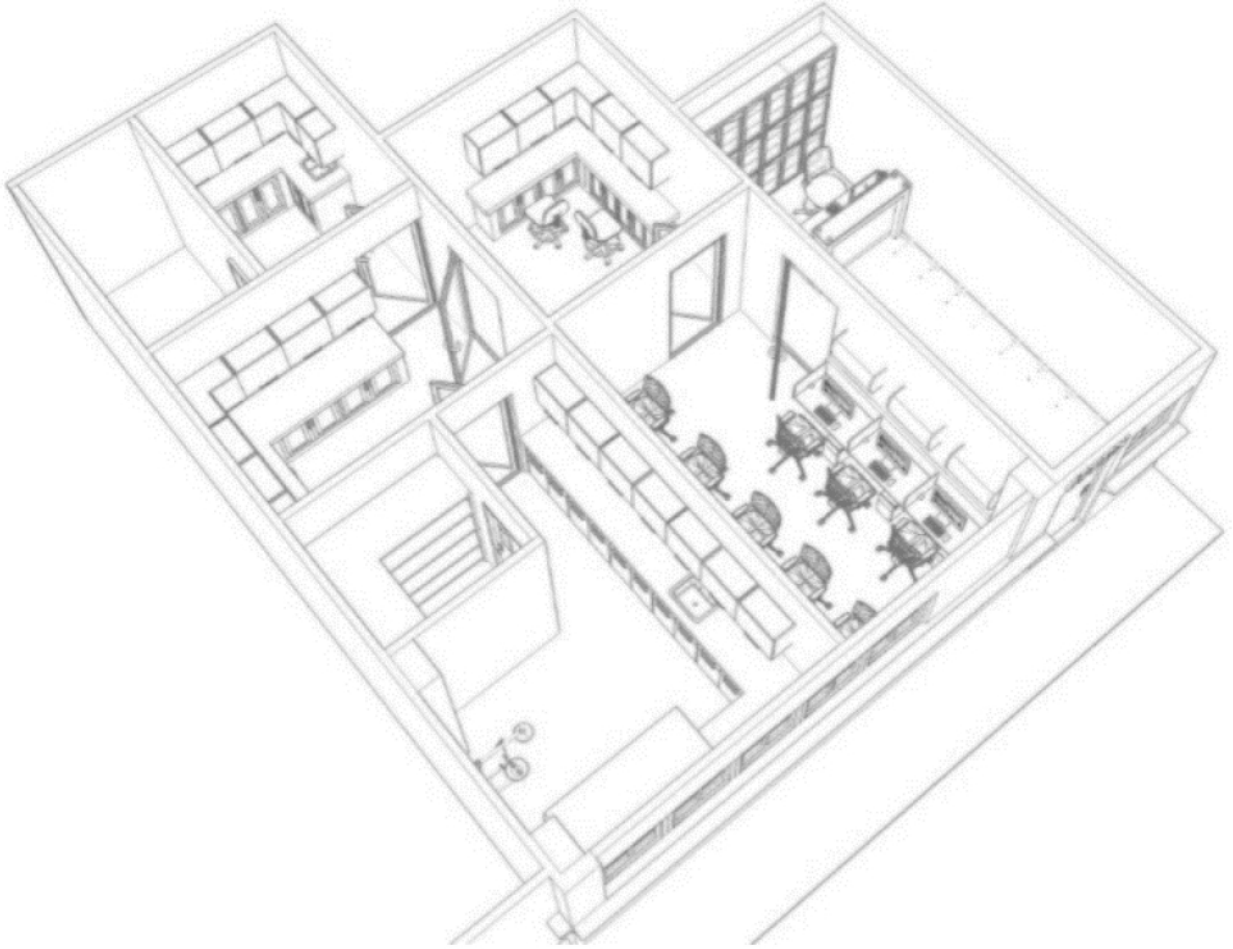


Ilustración 8. Ilustración 8. Planos del CITEN donde se llevará a cabo la construcción del depósito.

3.2.2. Esquema de almacenamiento de desechos y áreas contiguas

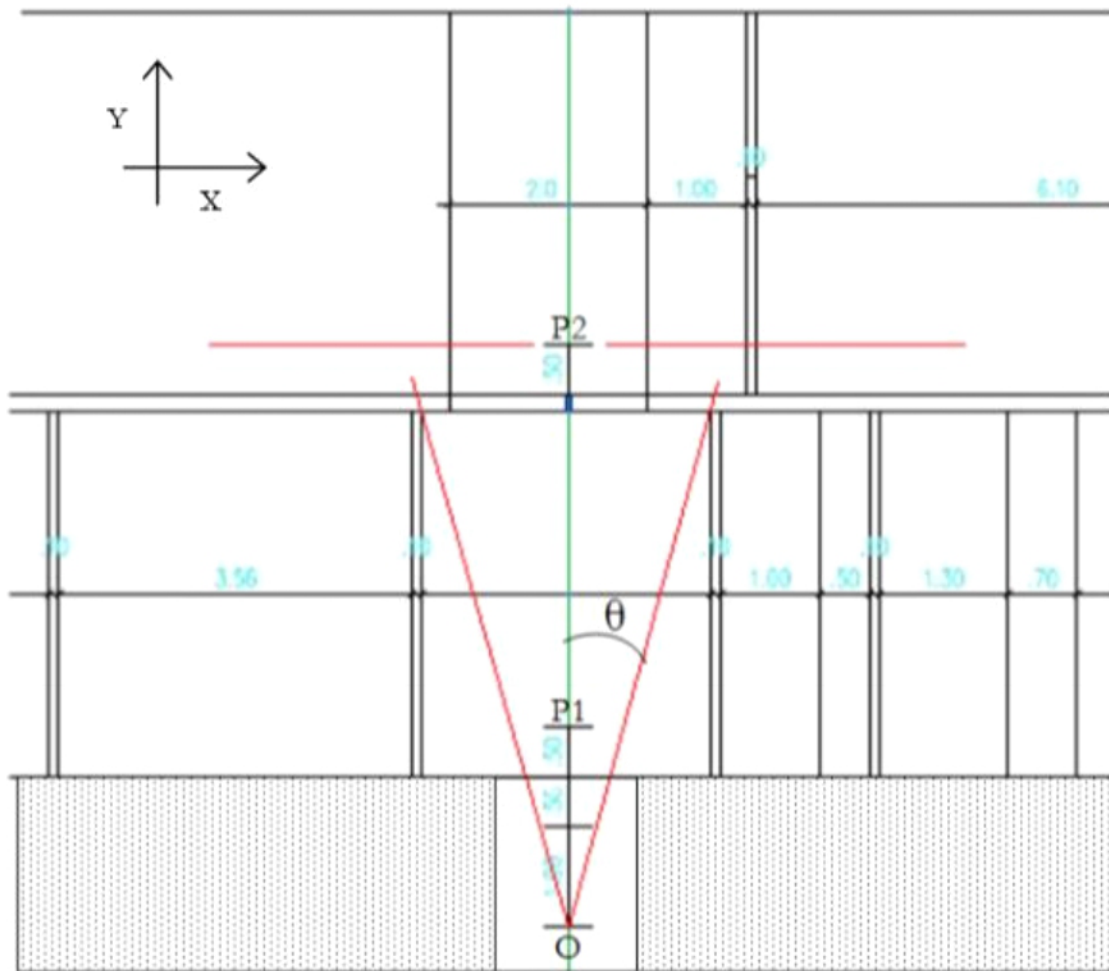


Ilustración 9. Punto 1 correspondiente al cálculo de espesor de material necesario para el recinto de desechos. Punto 2 correspondiente al punto para evaluar espesor del techo (losa) de concreto

3.3. Diseño de programa computacional para cálculo de barrera

Las barreras de nuestro deposito son diseñadas para atenuar casi toda la radiación producida por las fuentes de radiación, su espesor es dependiente del límite establecido por nosotros para nuestro de depósito, normalmente se distinguen dos tipos de barreras:

- **Barrera primaria:** se diseñan para atenuar el haz de radiación primaria generada por las fuentes. El espesor de esta barrera es dependiente de la cantidad de radiación colocada en él.

- **Barrera secundaria:** se diseña para atenuar la radiación dispersa del haz primario así también como la radiación de fuga que se dará al abrir el depósito. La radiación de fuga es típicamente de energía más alta que la radiación dispersa, y por consiguiente el espesor de la barrera secundaria es determinado en muchos casos por la radiación de fuga específicamente será la optimización que tomamos en cuenta para la tapa de del depósito.

3.4. Memoria de cálculo

El formalismo que se utiliza para realizar un cálculo de blindaje está enfocado en proporcionar una herramienta práctica pero debido a su carácter general está lejos de ser útil en el momento que se quiere plasmar los resultados de forma clara y concisa. Para resolver esta dificultad el experto debe desarrollar una memoria de cálculo de blindaje.

Una memoria de cálculo de blindaje está destinada a ser una referencia de la técnica que se utilizó para realizar el blindaje. Es un documento que debe perdurar en el tiempo.

Los países mediante las autoridades reguladoras pueden establecer pautas sobre las características que deben tener una memoria de cálculo. En el caso particular de Panamá no existe una norma guía para desarrollar una memoria y queda al criterio del especialista.

Los elementos que deben tener una memoria de cálculo es la siguiente:

- **Datos del lugar.** Es importante escribir la ubicación exacta de la instalación haciendo referencia al país, provincia, distrito, corregimiento y dirección específica. El agregar las coordenadas terrestres también es factible.
- **Objetivos.** El detallar objetivos que se buscan a desarrollar el cálculo es importante ya que pone en contexto al revisor sobre la finalidad última de todo el trabajo a realizar.
- **Característica de la fuente.** Las fuentes de radiación debido a su aplicación poseen características que deben ser tomadas en cuenta ya que el formalismo que se utilizará depende de los datos que se obtengan de la fuente.
- **Descripción de la instalación.** El lugar físico donde se construirá el blindaje debe ser descrito en detalle tomando en cuenta las zonas aledañas. Se puede hacer referencia a planos arquitectónicos adjuntos.
- **Consideraciones generales del cálculo.** Deben enlistarse todos los valores numéricos utilizados en el cálculo además de la simbología acorde al

formalismo. Se describen las características radiológicas de los materiales a utilizar.

- **Resumen detallado del formalismo de cálculo.** Es importante hacer una descripción breve del formalismo de cálculo que se utiliza.
- **Cálculo de blindaje.** Se describe las coordenadas, se caracterizan y nombran los puntos de cálculo, se determinan las distancias y se realizan los cálculos de los espesores de blindaje para los materiales disponibles. Se tabulan los resultados. Es importante hacer referencia a esquemas adjuntos.
- **Consideraciones finales.** Existe consideraciones que surgen producto de un análisis de los resultados y que deben estar escritas en el documento.
- **Referencias.** Es importante que los revisores tengan la información de donde se obtuvo datos, valores, el formalismo, etc.
- **Documentación adjunta.** Se debe adjuntar planos y los esquemas que ilustren las geometrías utilizadas para el cálculo.

La memoria de cálculo debe reposar en las instalaciones y las administraciones actuales y futuras deben resguardarlas hasta el cese de operaciones.

3.5. Selección del blindaje

Para determinar el cumplimiento de los límites de dosis para el público en general, se realizan cálculos y mediciones para mostrar que las personas en las áreas que rodean a la fuente de radiación no superarán los límites reglamentarios. Los cálculos deben confirmarse realizando una medición de los niveles de dosis que rodean la fuente de

radiación después de la instalación utilizando un instrumento apropiado. Estos cálculos deben revisarse periódicamente para confirmar que las suposiciones hechas durante el proceso de diseño siguen siendo válidas.

Las áreas alrededor de las fuentes de radiación deben estar protegidas para garantizar que los trabajadores y el público en general no estén expuestos a niveles de dosis que excedan los límites.

La naturaleza de nuestro blindaje estará determinada por las siguientes características:

- ¿Con qué frecuencia se usa la fuente de radiación?
- ¿Con qué frecuencia se dirige en una dirección particular?
- Si el haz primario choca directamente con la barrera o no.
- Con qué frecuencia el área contigua está ocupada (factor de ocupación, T)
- ¿Quién ocupa el área? (trabajador de radiación, área controlada o público en general, área no controlada que determinará el límite de diseño, P, generalmente expresada en dosis efectiva por semana)
- La distancia (d) al área de interés
- El tipo de fuente de radiación (rayos X kV, rayos X MV, radioisótopo, haz de partículas).

La ecuación (14) es básica para calcular el factor de transmisión (B) para la barrera requerida para reducir la dosis en un área para el objetivo de diseño.

El límite de diseño generalmente es expresado como dosis por unidad de tiempo. A partir del factor de transmisión (B), el número de capas de decirreductora (el espesor requerido para reducir la transmisión por un factor de 10, TVL) es:

$$n = -\log(B)$$

El espesor (X) se calcula mediante:

$$x = TVL_1 + (n - 1) \cdot TVL_e$$

TVL_1 es el primer TVL. Los TVL subsiguientes son diferentes debido a los cambios espectrales en el haz a medida que penetra en la barrera y se denominan TVL_e .

Los factores de ocupación (T) están diseñados para reducir el blindaje en áreas con baja probabilidad de que una persona ocupe esa área. Al realizar cálculos de blindaje para un área de baja ocupación, como un baño público, la dosis también debe evaluarse para áreas de alta ocupación más allá de ella.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Modelo matemático de la dosis

Cuando se calcula un blindaje para un recinto, los valores obtenidos son utilizados para construir la instalación donde se alojará la fuente. Después de la construcción y colocación de la fuente la autoridad reguladora realiza un levantamiento de nivel o levantamiento radiométrico, es decir, evalúa mediante técnicas de medición directa de las tasas de dosis en torno a los blindajes y dichos valores deben de ser menor o igual a los utilizados en el cálculo de blindaje. Si no cumplen debe estimarse un espesor para compensar la falta de blindaje.

Pero existen casos particulares donde es imposible colocar la totalidad de la fuente ya que la carga máxima no ocurrirá transcurrido un tiempo que pueden ser años. Este es el caso de los recintos donde se almacenan fuentes en desuso. La evaluación de los mismos mediante mediciones directa es imposible.

La solución que los físicos plantean para resolver este problema es modelar matemáticamente el escenario y determinar la forma de la distribución de dosis en torno al blindaje.

Este modelado puede realizarse utilizando diferentes métodos, una simulación predictiva mediante algoritmos basados en Montecarlo. También se puede resolver la ecuación de transporte para cada determinar las distribuciones de dosis. La dificultad que presentan estos métodos es que se necesita un poder de cálculo computacional importante y cuyos resultados sobrepasan las metodologías de los formalismos de cálculo de blindaje que siempre buscan resolver los problemas de forma práctica.

La metodología que sugiere este trabajo es modelar un plano posterior al blindaje y calcular la tasa de dosis en cada punto del plano cuando la radiación emitida por la fuente ha atravesado los espesores de material blindante. Luego analizar la forma en que se distribuye la dosis en busca de puntos calientes o máximos de dosis.

Modelo unidimensional

Imaginemos una fuente radiactiva de actividad A que se encuentra en el origen de coordenadas $O (x=0, y=0, z=0)$. La tasa de dosis D_0 en un punto $Q(x,0,0)$ está dado por:

$$D_0(x, 0, 0) = \Gamma \frac{A}{x^2} f \quad (17)$$

Si se interpone un blindaje entre O y Q de espesor e , la tasa de dosis en Q sería:

$$D(x, 0, 0) = B D_0(x, 0, 0) \quad (18)$$

Donde la transmisión B está dada por:

$$B = 10^{-\left[1 + \left(\frac{e - TVL_1}{TVL_e}\right)\right]} \quad (19)$$

Finalmente, la tasa de dosis en Q está dado por:

$$D(x, 0, 0) = D_0(x, 0, 0) 10^{-\left[1 + \left(\frac{e - TVL_1}{TVL_e}\right)\right]} \quad (20)$$

$$D(x, 0, 0) = \Gamma \frac{A}{x^2} f 10^{-\left[1 + \left(\frac{e - TVL_1}{TVL_e}\right)\right]} \quad (21)$$

Esta sería la función de dosis que evalúa la tasa de dosis en puntos sobre el eje horizontal para un espesor de blindaje único e . Un análisis simple indica que la tasa de dosis varía con el inverso cuadrado del módulo de x ello indica que a medida que aumenta x menor es la tasa y que mayor es la tasa de dosis cuando el punto Q se aproxima al blindaje.

Análisis bidimensional

Del análisis anterior deseamos calcular la tasa de dosis en un punto P (x,y ,0) como se muestra en el siguiente diagrama.

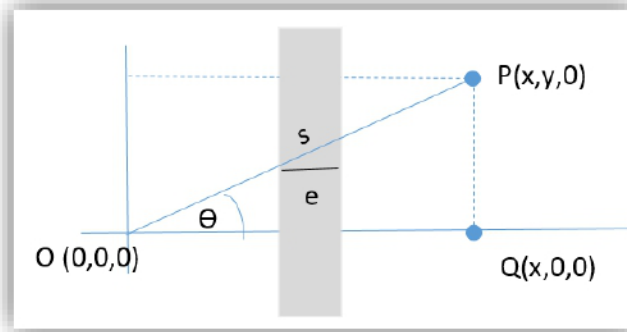


Ilustración 10. Esquema de la ubicación de la fuente en el origen de coordenadas

La tasa de dosis en sin material blindante en P está dado por:

$$D_0(x, y, 0) = \Gamma \frac{A}{x^2+y^2} f \quad (22)$$

Si se interpone un blindaje entre O y Q de espesor e, la tasa de dosis en P seria:

$$D(x, y, 0) = B(s)D_0(x, y, 0)$$

Según el diagrama, el espesor s es una función del ángulo y siempre se cumple que $s \geq e$. La forma del espesor s en términos de las coordenadas de P está dada como:

$$s(x, y, 0) = e \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{x} \quad (23)$$

La transmisión estaría definida como:

$$B(x, y, 0) = 10 \left[1 + \left(\frac{e \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{x} - TVL_1}{TVL_e} \right) \right] \quad (24)$$

La tasa de dosis en P estaría dada por:

$$D(x, y, 0) = \Gamma \frac{A}{x^2+y^2} f 10^{-\left[1 + \left(\frac{e^{\sqrt{x^2+y^2}}}{x} - TVL_e\right)\right]} \quad (25)$$

A diferencia del modelaje unidimensional, este modelo bidimensional no se puede analizar de forma directa para obtener resultados contundentes. Es necesario un estudio profundo utilizando herramientas computacionales.

Es importante mencionar que, para evaluar la tasa de dosis, los puntos como P deben ser acotados a una región ya que la dimensión perpendicular espesor no es infinito y por tanto existirán puntos cuyo espesor no existe y se generarían falsos puntos caliente. Este es un punto importante cuando se realiza un modelo matemático tridimensional.

El número de materiales blindantes interpuestos pueden ser mayor que uno y las funciones de dosis tendrán tantas componentes exponenciales como espesores se agreguen.

Utilizando estas herramientas se abordará el problema de calcular la función de dosis en una región por encima de la losa y que es debida a los fotones que atraviesan la tapa del recinto de fuentes en desuso y la misma losa.

4.2. Modelización de la distribución de dosis en el plano

Para determinar la distribución de dosis detrás de la barrera es necesario definir la región de cálculo. Esta región estará definida por un plano XYZ.

El plano de cálculo debe cumplir con los siguientes parámetros:

$$-x_{max} \leq x \leq x_{max}$$

$$-y_{max} \leq y \leq y_{max}$$

$$z = z_0$$

4.2.1. Definición de los valores máximos de xy:

Consideramos el siguiente esquema:

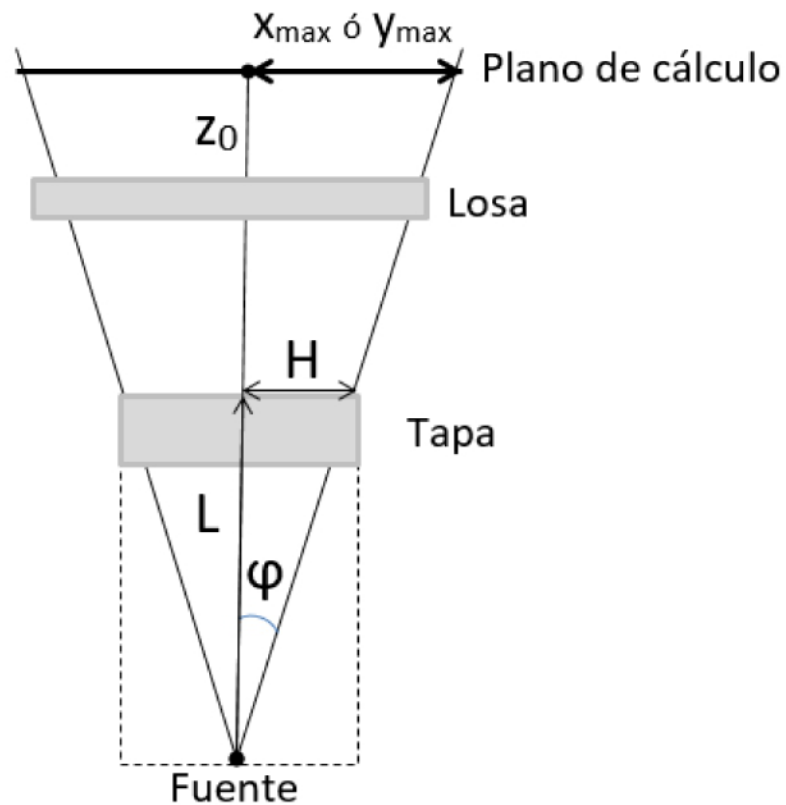


Ilustración 11. Definición de los valores máximos de x,y

Donde H es la longitud de la mitad de la longitud de la tapa del blindaje del recinto de desechos radiactivos y L la distancia de fuente a la superficie externa de la tapa.

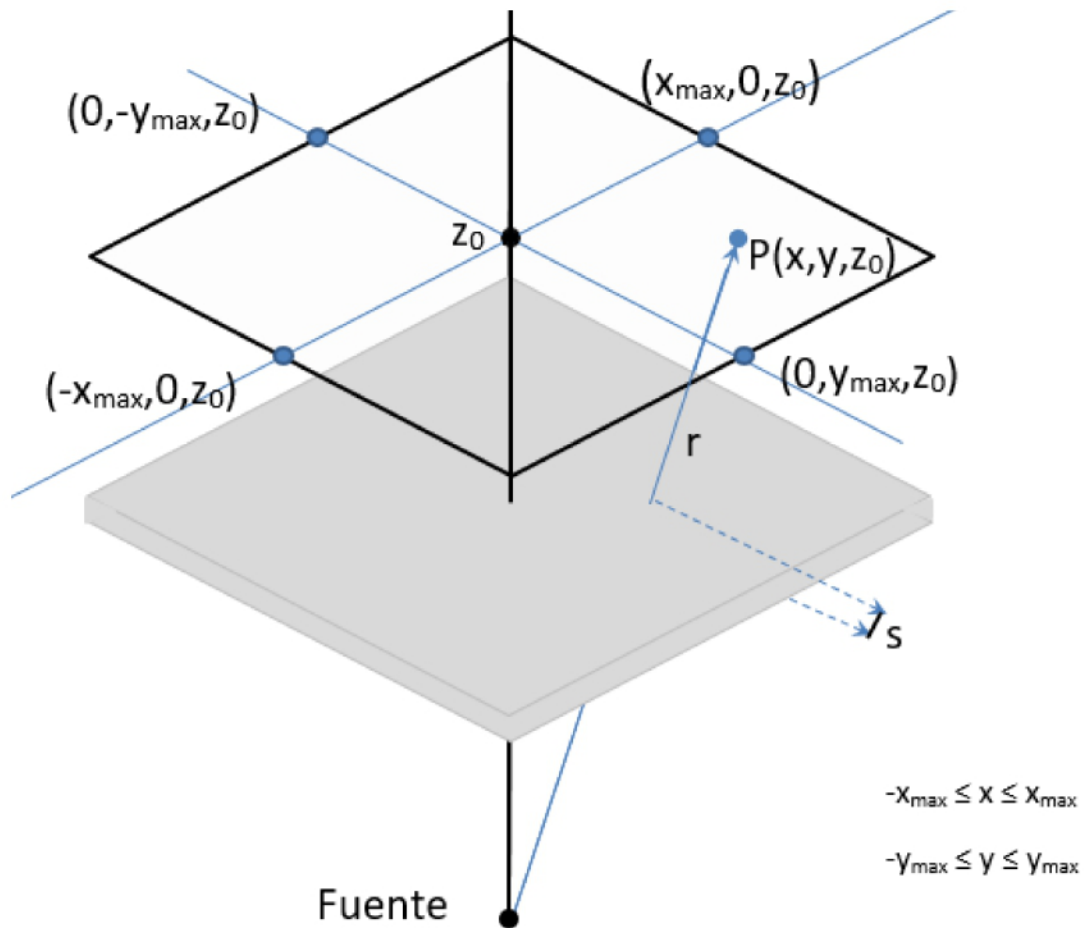


Ilustración 12. Representación de la región donde se calculará la distribución de dosis generada por la fuente contenida en el recinto blindado

4.2.2. Función de dosis

La función de dosis en un punto P perteneciente a la región de cálculo detrás de la barrera está definida como:

$$D(x, y, z) = d(x, y, z) \prod_{n=1}^{\infty} B_n[s_n(x, y, z)] \quad (26)$$

Donde **D** es la función de distribución de dosis en el plano de cálculo detrás de la barrera.

d es la dosis calculada sin barrera en un punto P en el plano de cálculo.

B es la función de transmisión debida cada barrera interpuestas entre la fuente y el punto P.

s es el espesor oblicuo de los medios atenuadores que el haz de radiación atraviesa.

4.2.3. Función de dosis detrás de la losa

El plano de cálculo se define en $z = z_0$ y corresponde a una región que se encuentra detrás de la losa.

Debido a que la radiación atraviesa la tapa del blindaje (*Figura 12*) del recinto de desechos radiactivos y luego la losa de concreto, $n = \{1, 2\}$

Para la simulación, la función de dosis en el plano de cálculo x, y, z_0 se expresa como:

$$D(x, y, z_0) = d(x, y, z_0) B_1[s_1(x, y, z_0)] B_2[s_2(x, y, z_0)] \quad (27)$$

Las funciones s_1 y s_2 se definen como:

$$s_1(x, y, z_0) = e_1 \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}}{z_0} \quad (28)$$

$$s_2(x, y, z_0) = e_2 \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}}{z_0} \quad (29)$$

Donde e_1 y e_2 son los espesores de blindaje calculados para la tapa y la losa respectivamente.

La función d se define como:

$$d(x, y, z_0) = \frac{\Gamma A f_t}{x^2 + y^2 + z_0^2} \quad (30)$$

La función de transmisión en el punto, B está definida como:

$$B(s) = 10^{-\left[1 + \left(\frac{s - TVL_1}{TVL_e}\right)\right]} \quad (31)$$

De allí que:

$$B_1(x, y, z_0) B_2(x, y, z_0) = 10^{-\left[1 + \left(\frac{e_1 \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}}{z_0} - (TVL_1)_1}{(TVL_e)_1}\right)\right]} 10^{-\left[1 + \left(\frac{e_2 \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}}{z_0} - (TVL_1)_2}{(TVL_e)_2}\right)\right]} \quad (32)$$

La función de dosis detrás de la losa tiene la siguiente forma:

$$D(x, y, z_0) = \frac{\Gamma A f_t}{x^2 + y^2 + z_0^2} 10^{-\left[1 + \left(\frac{e_1 \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}}{z_0} - (TVL_1)_1}{(TVL_e)_1}\right)\right]} 10^{-\left[1 + \left(\frac{e_2 \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}}{z_0} - (TVL_1)_2}{(TVL_e)_2}\right)\right]} \quad (33)$$

Los valores de los TVL dependen del material de construcción. En el caso de la simulación por computadora, el material tanto para la tapa y la losa es el concreto.

4.2.4. Análisis usando Matlab

Se realizó un programa que depende de los valores de los obtenidos en el cálculo de blindaje del recinto para desecho y la evaluación del espesor de la losa. Este programa modela la función $D(x, y, z_0)$ para un plano generado detrás de la losa y genera una superficie tridimensional y las correspondientes curvas de nivel. La superficie se muestra en la ilustración 13.

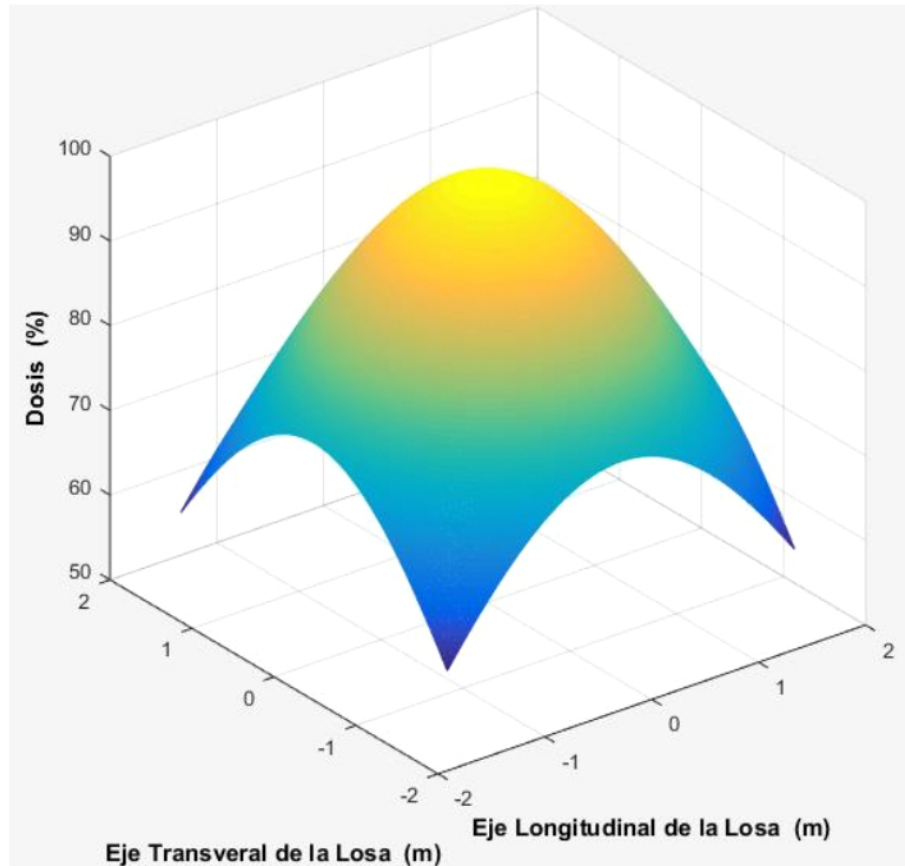


Ilustración 13. Grafica de superficie de la función de dosis en el plano definido después de la losa

Las regiones en el borde del plano de la losa pintadas en tonos de azul son regiones de bajas dosis (relativas a la dosis máxima) esto se debe a que entre más lejos este el punto de cálculo del eje del plano, los espesores son más oblicuos y por lo tanto de mayor es su dimensión que el calculado inicialmente para la losa.

Las regiones en torno del centro del plano (eje) son las que tienen mayor dosis, representada con tonos de amarillos. La región que se define como máxima de dosis, sus valores no superan 100% (corresponde a lo calculado como $P/T = 8 \text{ mSv/año}$).

Esta simulación representa las condiciones que se darían cuando el recinto de fuentes en desuso este a su máxima capacidad. En la siguiente tabla se muestran algunos valores de dosis relativa (y absoluta) en función de la posición en el plano de losa.

Dosis (%)	Dosis (mSv/año)	x (m)	y (m)	r (m)
100	8.00	0.00	0.00	0.00
98.4	7.87	-0.38	0.00	0.38
96.8	7.75	-0.55	0.00	0.55
95.0	7.60	-0.68	0.00	0.68
93.4	7.47	-0.80	0.00	0.80
91.6	7.33	-0.91	0.00	0.91
89.9	7.19	-1.00	0.00	1.00
88.0	7.04	-1.10	0.00	1.10
85.2	6.82	-1.23	0.00	1.23
82.5	6.60	-1.35	0.00	1.35
79.9	6.39	-1.46	0.00	1.46
76.2	6.09	-1.61	0.00	1.61

Cuadro VI. Algunos valores de dosis relativa y absoluta en puntos del plano de cálculo (losa) tomados de la curva de nivel.

Se concluye que los niveles de dosis en toda la región de la losa que se ve afectada por la construcción del recinto de desechos cumple con el límite de público. En la ilustración 14 se ilustra la forma en que se distribuyen los niveles de dosis porcentual y relativos al límite del público; desde el punto de vista de protección radiológica, el diseño del recinto de fuentes en desuso cumple con lo establecido por la normativa nacional vigente porque respeta los niveles establecidos.

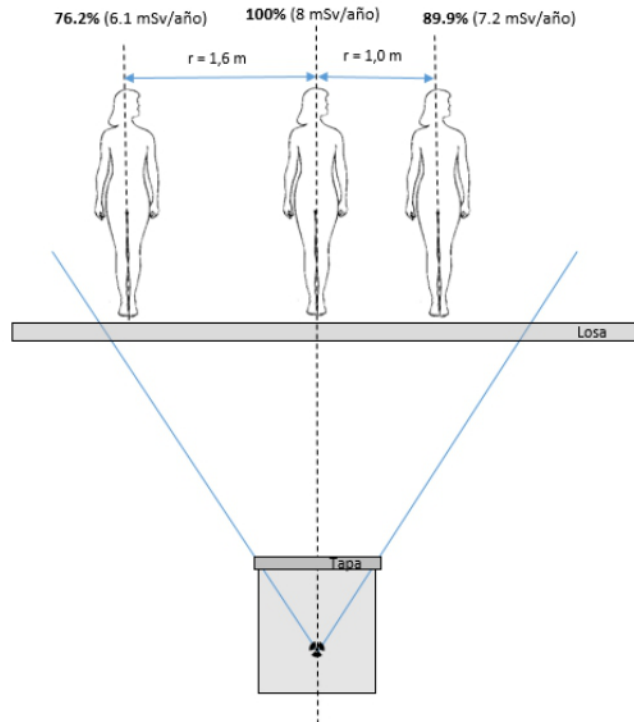


Ilustración 14. Esquema que ilustra diversas distribuciones de dosis en el plano de la losa. Una persona de público siempre recibirá una dosis igual o menor que el límite de diseño P/T = 8 mSv/año.

Con la información de la función de dosis se puede mejorar la protección de la zona haciendo una optimización de las dosis máximas para disminuirlas de forma que sea razonablemente alcanzables.

4.3. Optimización del blindaje

La optimización de la dosis es en Protección Radiológica el segundo principio fundamental. En esta tesis se aprovecha la información de la simulación de las distribuciones de dosis para disminuir los niveles de dosis después de la losa mediante el diseño de un blindaje con forma y espesor personalizado.

La función de dosis $D(x, y, z_0)$ en el espacio tiene una forma característica, un máximo de dosis que representa el punto más “caliente” del área. Sus curvas de nivel tienen una geometría característica. Utilizando estos dos elementos es posible ajustar el blindaje de la tapa de forma tal que se pueda hacer una reducción en los niveles de dosis después de la losa del edificio en un porcentaje conservador. En la siguiente figura se esquematiza el proceso.

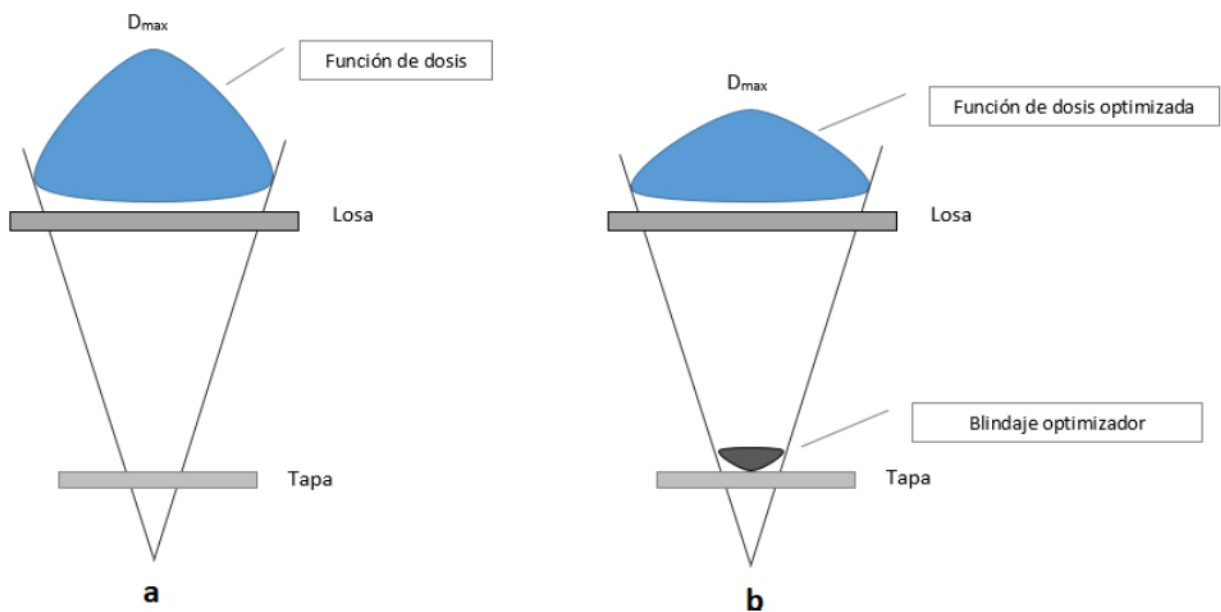


Figura 1. (a) Función de dosis generada por los medios atenuadores. (b) Función de dosis optimizada por un blindaje diseñado utilizando la forma y valores máximos de la función de dosis en a.

4.3.1. Método sugerido para optimizar la función de dosis

El problema de optimizar el blindaje se resuelve en dos etapas. La primera etapa consiste en encontrar las curvas de isodosis donde la dosis sea máxima esto se logra resolviendo para $\frac{\partial D(x,y,z_0)}{\partial x} = 0$ y $\frac{\partial D(x,y,z_0)}{\partial y} = 0$ y recalculando los espesores necesarios

para modular los valores de dosis en base de “*constraints*” o restricciones de optimización. La segunda etapa es diseñar una estructura en base a la forma de las curvas de isodosis y tomando en cuenta los valores de los espesores calculados en cada punto y reescalar al plano de la tapa del bunker (figura 78).

4.3.2. Método utilizado en la tesis

Aunque la metodología anteriormente descrita es la adecuada para optimizar el blindaje se tuvo algunas complicaciones para desarrollar el algoritmo en su totalidad. Se optó por desarrollar una interfaz gráfica que mediante un tratamiento de imágenes se obtienen valores de dosis máximas y geométricos para un cálculo de los espesores que se utilizaran en la confección del blindaje.

4.3.3. Optimización por imágenes

Para optimizar una región de dosis se necesita calcular la función de distribución de dosis descrito mediante el modelado matemático de la ecuación (33). Esta función tiene regiones de máxima dosis, así como regiones de baja dosis como de muestra en la ilustración 15.

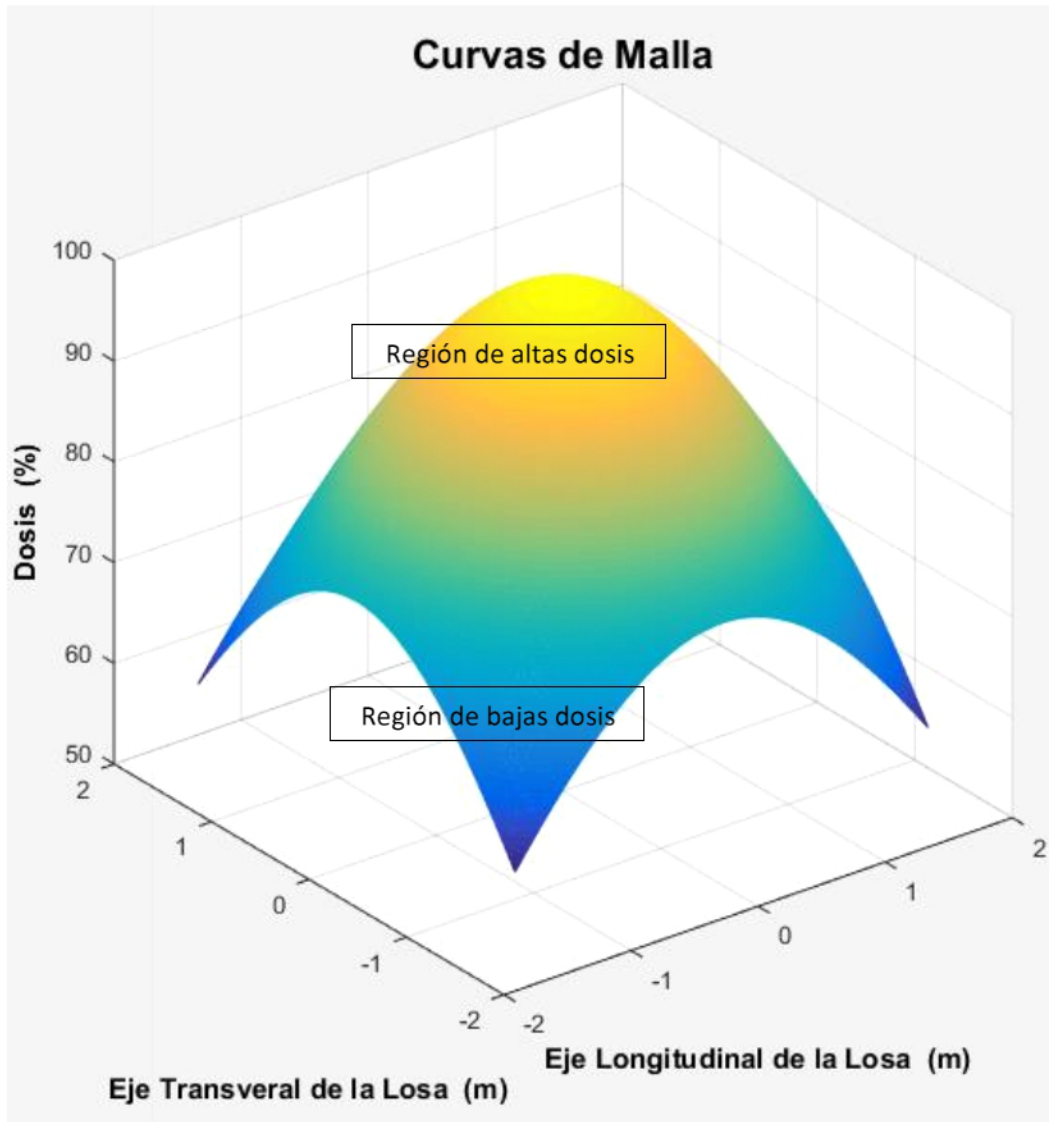


Ilustración 15. Regiones de máxima y mínima dosis descritas en la función de distribución de dosis sobre el plano de la losa

Mediante el uso de curvas de nivel de la función de distribución de dosis es posible escoger la región de máxima dosis que se desea optimizar. Ilustración 16

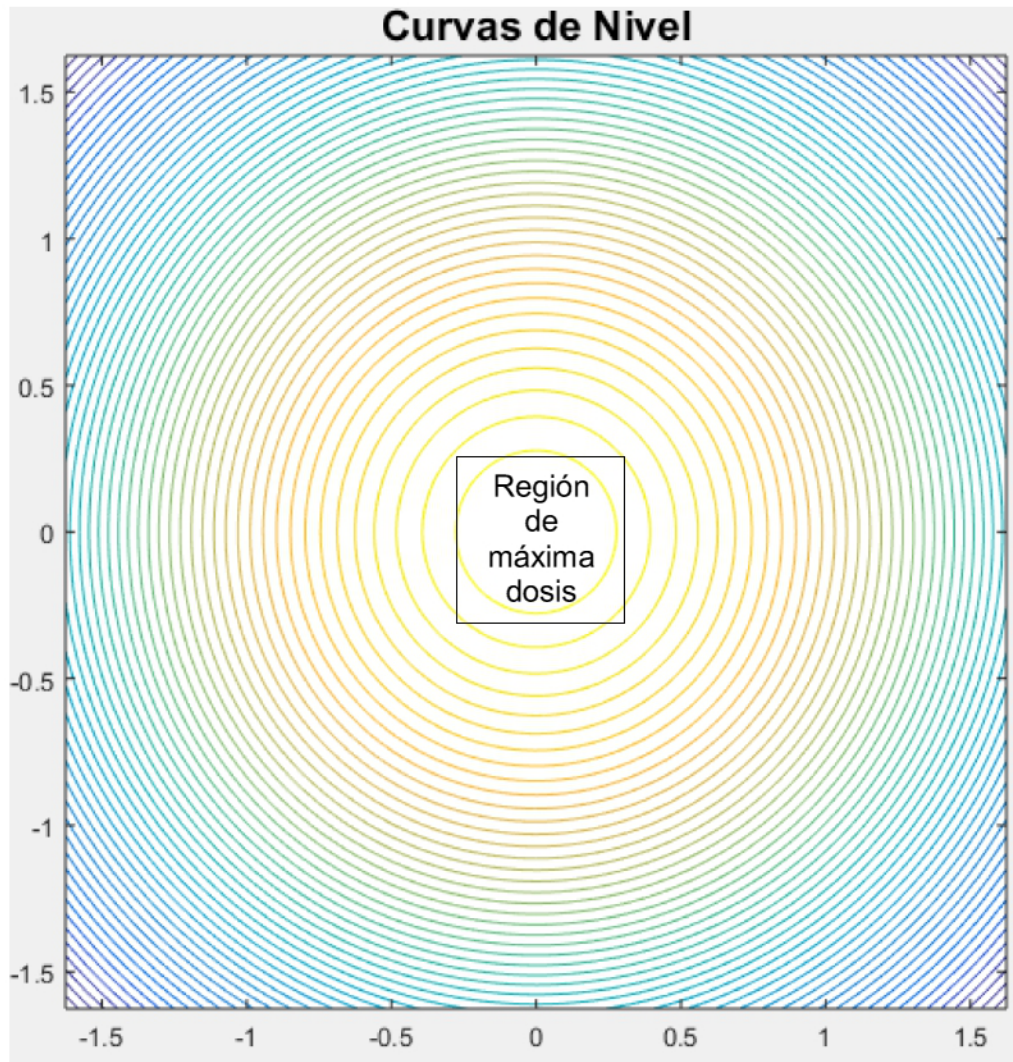


Ilustración 16. Región de máxima dosis descritas en las curvas de nivel de la función de distribución de dosis sobre el plano de la losa

Consideremos una curva de nivel de dosis máxima D_{max} , si se quiere disminuir dicha dosis en un porcentaje conservador $C(D)$. la dosis de optimización (D_{op}) sería:

$$D_{op} = D_{max} - \frac{D_{max} \cdot C(D)}{100} \quad (34)$$

Reordenando términos,

$$\frac{D_{op}}{D_{max}} = \frac{100 - C(D)}{100} \quad (35)$$

Podemos definir entonces una transmisión de optimización como:

$$B_{op} = \frac{D_{op}}{D_{max}} \quad (36)$$

A su vez podemos calcular el número de espesores de TVL necesarios para disminuir D_{max} a D_{op} :

$$n_{op} = -\log(B_{op}) = -\log\left[\frac{100 - C(D)}{100}\right] \quad (37)$$

Finalmente, el espesor de material blindante necesario para cumplir con la optimización de la región de máxima dosis está dado por:

$$x_{op} = TVL_1 + (n_{op} - 1) \cdot TVL_e$$

Utilizando la información de las curvas de nivel, podemos estimar la superficie del material blindante. Para esto se necesita asumir que las curvas son círculos con el origen en (0,0). Se escoge una curva para optimizar y se obtiene las coordenadas (x,y) correspondiente a un punto de la curva. Con estos valores se puede determinar un valor aproximado de la superficie que debe tener el material blindante en el plano de la losa. Reescalando esta superficie al plano de la tapa del recinto de desechos radiactivos se obtiene el espesor optimizado.

4.3.4. Metodología

Luego del cálculo de los blindajes, en el menú se debe presionar el botón de “Análisis del blindaje” Aparecerá el programa que permite calcular la función de distribución de dosis en el plano de la losa. Al oprimir el botón calcular, se genera la función de dosis que permite evaluar las regiones de dosis en el plano de la dosis. También se genera las curvas de nivel. Sobre las curvas de nivel y utilizando la herramienta de puntos, se escoge la curva a optimizar se obtiene los valores de x, y dentro de la curva.

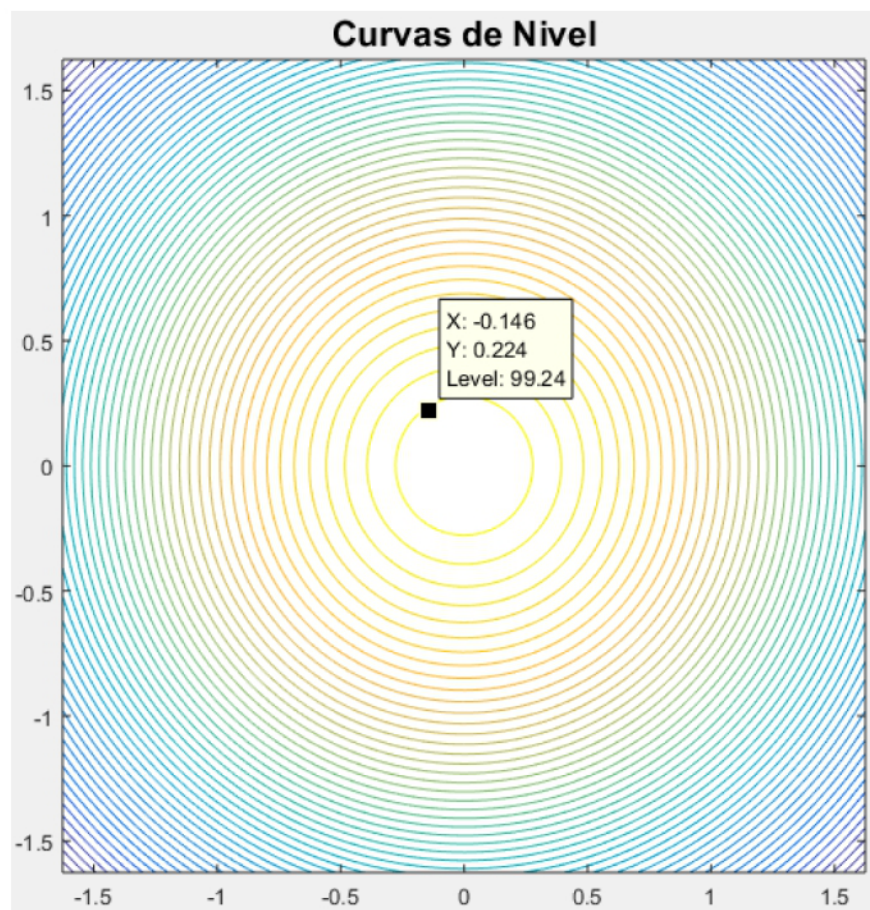


Ilustración 17. Región de dosis de la función de distribución de dosis; se pretende que esta región se optimice y disminuya en un $C(D) = 10\%$.

Se alimentan al programa con los valores $C(D)$, x , y . Este arroja es espesor de plomo necesario para la optimización, la superficie del círculo (y diámetro) en el plano de la tapa del recinto (ilustración 18).

The image shows a software interface for optimization, divided into four main sections:

- DATOS PARA LA OPTIMIZACIÓN:** This section contains three input fields. The first is labeled 'Porcenta de dosis' with a value of '10' and a '%' symbol. The second is labeled 'Valor de x' with a value of '-0.146' and an 'm' symbol. The third is labeled 'Valor de y' with a value of '0.224' and an 'm' symbol.
- OPTIMIZACIÓN DEL BLINDAJE:** This section contains a single button labeled 'OPTIMIZACIÓN'.
- ESPESOR DE OPTIMIZADO:** This section displays the result '3.53803 mm Pb'.
- SUPERFICIE Y DIÁMETRO OPTIMIZADOS:** This section displays two results: 'Superficie' with a value of '147.845 cm² Pb' and 'Diámetro' with a value of '13.7202 cm Pb'. Below these results is a button labeled 'Esquema'.

Ilustración 18. En el programa de optimización por imágenes, se alimente con los datos de la región y el valor optimización $C(D)$. Los resultados se obtienen una vez se oprime el botón de optimización.

Se puede tener un esquema de la forma del blindaje optimizado. Solo es para motivos ilustrativos ya que no está a escala real (ilustración 19).



Ilustración 19. Esquema ilustrativo generado por el programa para dar una idea de la forma del blindaje optimizador. No toma en cuenta las escalas

En la siguiente figura ilustra el proceso de optimización. La región que se busca optimizar es una de alta dosis. En el plano de cálculo se aproxima a un círculo (como se muestra las curvas de nivel).

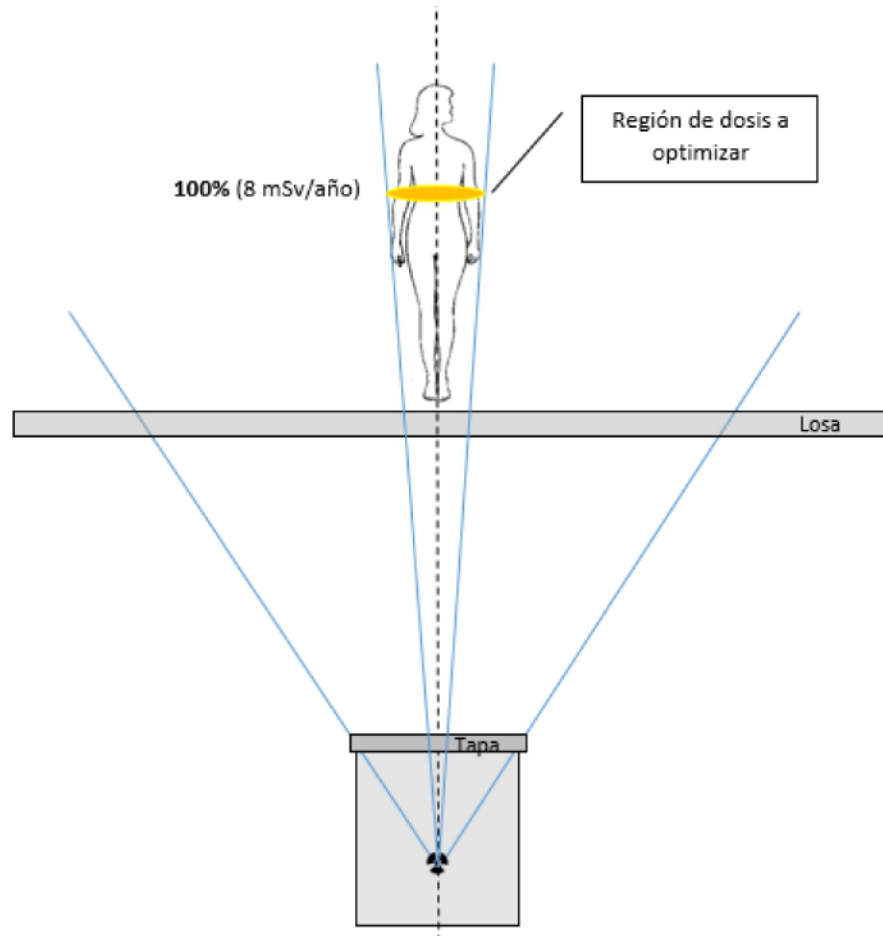


Ilustración 20. Ilustración del proceso de optimización. La región escogida es de alta dosis y está definida en primera aproximación como un círculo

Una vez utilizado la optimización por imágenes el resultado es la reducción de la dosis la región escogida (en el ejemplo en un 10%). El programa da las dimensiones del blindaje que debe ser colocado sobre la tapa del recinto de fuentes en desuso como se muestra en la ilustración 21.

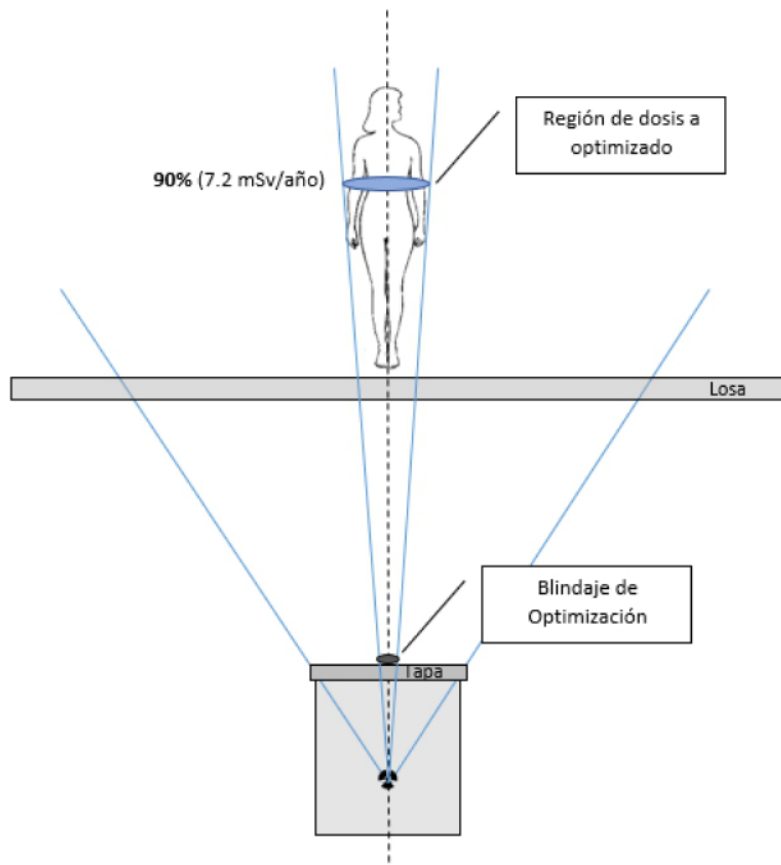


Ilustración 21. Ilustración del proceso de optimización. La región escogida de alta dosis (ilustración 20)) es optimizada generando el espesor y tamaño de la superficie de material blindante. Se colocar el blindaje sobre la tapa como se muestra en la imagen

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusión

- Los fundamentos básicos de la física de las radiaciones y el segundo y tercer principios fundamentales de la Protección Radiológica permitieron seleccionar los protocolos adecuados y recomendados para el cálculo de blindajes para el búnker que alojará las fuentes de radicación en desuso, dando cumplimiento a la normativa respecto a los límites de dosis para el personal ocupacional, el público y el ambiente.
- Se modeló las distribuciones de dosis para resolver el problema de la radiometría y se aplicó herramientas computacionales de programación para simular estas distribuciones.
- Las áreas que colindan, tipo de personal, carga de trabajo planificada, técnicas de tratamiento y el diseño propio de la instalación son factores determinantes en el cálculo del espesor de las barreras primarias, secundarias.
- Utilizando las curvas de nivel que dieron como resultado en la simulación nos permitió ajustar el blindaje de la tapa de forma tal que se pueden disminuir aún más la dosis a las personas que transitan en el pasillo que se encuentra encima del recinto de los desechos radiactivos.
- La energía de los fotones de rayos gamma emitidos por el conjunto de los desechos debe ser menor o igual que 0,662 MeV.

5.2. Recomendaciones

- Cada 5 años, el encargado del Citen debe de enviar un reporte sobre los niveles de radiación existentes fuera del depósito de radiación.

- Establecer y manejar el sistema nacional de registro y control de materiales que se encuentre en el depósito.
- Establecer los requisitos para dar programas de capacitación técnica sobre aspectos relacionados con la seguridad nuclear, radiológica y física en la Universidad de Panamá.
- Mejoramiento del método en la optimización del blindaje a través de las funciones de dosis.
- Desarrollar un algoritmo de cálculo para ayudar a construir blindajes optimizados personalizados.

CÓDIGO FUENTE

ANÁLISIS DE BLINDAJE

```
xxcfunction varargout = ANALISIS_BLINDAJE(varargin)
% ANALISIS_BLINDAJE MATLAB code for ANALISIS_BLINDAJE.fig
% ANALISIS_BLINDAJE, by itself, creates a new ANALISIS_BLINDAJE or raises
the existing
% singleton*.
% H = ANALISIS_BLINDAJE returns the handle to a new ANALISIS_BLINDAJE or
the handle to
% the existing singleton*.
% ANALISIS_BLINDAJE('CALLBACK', hObject, eventData, handles,...) calls the
local
% function named CALLBACK in ANALISIS_BLINDAJE.M with the given input
arguments.
% ANALISIS_BLINDAJE('Property','Value',...) creates a new
ANALISIS_BLINDAJE or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before ANALISIS_BLINDAJE_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to ANALISIS_BLINDAJE_OpeningFcn via varargin.
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help ANALISIS_BLINDAJE
% Last Modified by GUIDE v2.5 07-Aug-2018 16:05:03
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @ANALISIS_BLINDAJE_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @ANALISIS_BLINDAJE_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

```

end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before ANALISIS_BLINDAJE is made visible.
function ANALISIS_BLINDAJE_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to ANALISIS_BLINDAJE (see VARARGIN)
% Choose default command line output for ANALISIS_BLINDAJE
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes ANALISIS_BLINDAJE wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = ANALISIS_BLINDAJE_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global angulo_max x_tapa dist_cal x_losa PT_losa TVL_conc1 TVL_conce Z0 xang;
Act = 37000; %MBq
gamma = 7.72E-5; %mSv m^2/MBq h
ft2 = 4500; % h/año 1 año = 50 sem; para 1 dia = 15 h; 1 semana = 6 dias
fdose = 1.008; %1.2*0.84;
TVL_conc1 = 21.4; %TVL 1 en cm
TVL_conce = 16.1; %TVL equilibrio en cm
Z0 = sqrt(dist_cal); %m
ang1 = angulo_max ; %°
S1 = x_tapa; %cm 19.36
S2 = x_losa ; %cm 18.20

```

```

xymax = Z0*tan(ang1*(pi/180));
x = [-xymax:0.01:xymax];
y = [-xymax:0.01:xymax];
n = length(x);
for i=1:n;
    for j = 1:n
        r(i,j) = ((x(i))^2 + (y(j))^2 + Z0^2); % Radio al cuadrado medido desde el origena
al punto.
        coseno0(i,j) = Z0./sqrt((x(i))^2 + (y(j))^2 + Z0^2); %Coseno del angulo medido
entre el eje z          %sqrt((x(j))^2 + (y(j))^2)./sqrt((x(j))^2 + (y(j))^2 +
Z0^2);
        s1(i,j)=(S1./coseno0(i,j))-TVL_conc1; % Espesor oblicuo barrera del recinto
        B1(i,j) = 10^(-(1+(s1(i,j))./TVL_conce)); %Transmision de debida al
primer espesor oblicuo
        s2(i,j)=(S2./coseno0(i,j))-TVL_conc1; % Espesor oblicuo barrera de la losa
        B2(i,j) = 10^(-(1+(s2(i,j))./TVL_conce)); %Transmisi3n de debida al segundo
espesor oblicuo
        Dose(i,j)=(100./PT_losa).*(B1(i,j).*B2(i,j).*gamma.*Act.*ft2.*fdose)./r(i,j);
        Dose0(i,j)=(gamma.*Act.*ft2.*fdose)./r(i,j);
    end
end
Dosis = [Dose]; % Matriz de dosis porcentual
[A,B]=meshgrid(x,y); %Malla para graficar
axes(handles.axes1); %Definici3n del ejes del gr3fico 1
mesh(A,B,Dosis) %Gr3fica tridimensional

title(['\fontsize{16}Curvas de Malla']); %T3tulo gr3fica 1
xlabel({'Eje Longitudinal de la Losa (m)'},'FontSize',11,'FontWeight','bold','Color','k');
% Etiqueta X
ylabel({'Dosis (%)'},'FontSize',11,'FontWeight','bold','Color','k');          %
Etiqueta Z
xlabel({'Eje Transveral de la Losa (m)'},'FontSize',11,'FontWeight','bold','Color','k');
% Etiqueta Y
axes(handles.axes2); %Definici3n del ejes del gr3fico 2
contour(A,B,Dosis,50); %Gr3fica contorno
title(['\fontsize{16}Curvas de Nivel']); %Titulo gr3fica 2
%xlabel({'Eje Longitudinal de la Losa
(m)'},'FontSize',11,'FontWeight','bold','Color','k')
%ylabel({'Eje Transveral de la Losa
(m)'},'FontSize',11,'FontWeight','bold','Color','k')
%ylabel({'Dosis
(mSv)'},'FontSize',11,'FontWeight','bold','Color','k')
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin'; % Define linea en el origen X

```

```

ax.YAxisLocation = 'origin'; % Define linea en el origen Y
grid minor; %Grilla de la grafia contorno
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%-----Datos de Plomo-----
TVL_pb1 = 23.1; %TVL 1 en mm
TVL_pbe = 20.5; %TVL equilibrio en mm
global Z0 xang sopt diametroopt;
%-----Datos introducidos-----
dosisrel = str2double(get(handles.pdose,'String'));
xrel = str2double(get(handles.valx,'String'));
yrel = str2double(get(handles.valy,'String'));
%-----Numero de TVL de Plomo-----
nop=-log10((dosisrel/100));
%-----Espesor optimizado-----

sopt = TVL_pb1+((nop-1)*TVL_pbe);
set(handles.xopt,'String',sopt); %Salida del dato a la pantalla
%-----Cálculo de la superficie-----
rS = sqrt((xrel^2)+(yrel^2));
rB=(rS*(100/1))*(xang/Z0);
area=(rB^2)*pi;
diametroopt = 2*rB;
set(handles.areaopt,'String',area); %Salida del dato a la pantalla
set(handles.diamopt,'String',diametroopt); %Salida del dato a la pantalla
function pdose_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pdose (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of pdose as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of pdose as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function pdose_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pdose (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function valx_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to valx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of valx as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of valx as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function valx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to valx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function valy_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to valy (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of valy as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of valy as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function valy_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to valy (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%    See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO

```

ESQUEMA DEL BLINDAJE

```
function varargout = ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO(varargin)
% ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO MATLAB code for
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO.fig
%   ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO, by itself, creates a new
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO or raises the existing
%   singleton*.
%   H = ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO returns the handle to a new
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO or the handle to
%   the existing singleton*.

ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO('CALLBACK', hObject, eventData, handles
,...) calls the local
%   function named CALLBACK in ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO.M
with the given input arguments.
%   ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO('Property','Value',...) creates a new
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO_OpeningFcn via varargin.
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO
% Last Modified by GUIDE v2.5 07-Aug-2018 16:04:06
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
```

```

Gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',
@ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',
@ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO is made
visible.
function ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO
(see VARARGIN)
% Choose default command line output for
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO wait for user
response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout =
ESQUEMA_DEL_BLINDAJE_OPTIMIZADO_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
% varargin cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
%%
%
% <<FILENAME.PNG>>
%
I = imread('plancha2.jpg');
imshow(I)
global sopt diametroopt;
figdiametro=diametroopt;
figespesor=sopt;
set(handles.indiametro,'String',figdiametro);
set(handles.imespesor,'String',figespesor);
```

FORMALISMO DE TRANSMISIÓN

```
function varargout = FORMALISMO_TRANSMISION(varargin)
% FORMALISMO_TRANSMISION MATLAB code for
% FORMALISMO_TRANSMISION.fig
%   FORMALISMO_TRANSMISION, by itself, creates a new
%   FORMALISMO_TRANSMISION or raises the existing
%   singleton*.
%   H = FORMALISMO_TRANSMISION returns the handle to a new
%   FORMALISMO_TRANSMISION or the handle to
%   the existing singleton*.
%   FORMALISMO_TRANSMISION('CALLBACK', hObject,eventData,handles,...)
%   calls the local
%   function named CALLBACK in FORMALISMO_TRANSMISION.M with the given
%   input arguments.
%   FORMALISMO_TRANSMISION('Property','Value',...) creates a new
%   FORMALISMO_TRANSMISION or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before FORMALISMO_TRANSMISION_OpeningFcn gets
%   called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to FORMALISMO_TRANSMISION_OpeningFcn via
%   varargin.
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help FORMALISMO_TRANSMISION
% Last Modified by GUIDE v2.5 25-Apr-2018 15:05:04
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @FORMALISMO_TRANSMISION_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @FORMALISMO_TRANSMISION_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

```

% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before FORMALISMO_TRANSMISION is made visible.
function FORMALISMO_TRANSMISION_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to FORMALISMO_TRANSMISION (see
VARARGIN)
% Choose default command line output for FORMALISMO_TRANSMISION
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes FORMALISMO_TRANSMISION wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = FORMALISMO_TRANSMISION_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

contenido1 = get(hObject,'String');
%ALGORITMO PARA MENU POP-UP
z1=get(hObject,'value');
texto1= contenido1(z1);
switch cell2mat(texto1);
    case 'Cs-137'
        gamma = 7.72E-5; %mSv m^2/MBq h
        En=0.662; %MeV
    case 'Co-60'
        gamma = 0.000308; %mSv m^2/MBq h
        En=1.25; %MeV

```

```

        end
    global fgamma E;
    fgamma=gamma;
    E=En;
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu1 contents as cell
    array
    %     contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu1
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
    % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
    % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
    %     See ISPC and COMPUTER.
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
    get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end
    % --- Executes on selection change in popupmenu3.
    function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
    % hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
    % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
    contenido3 = get(hObject,'String');          %ALGORITMO PARA MENU POP-
    UP
    z3=get(hObject,'value');
    texto3= contenido3(z3);
    switch cell2mat(texto3);
        case 'mSv/año'
            ft = 1;
            %case 'uSv/sem'
            % ft = 0.013333333; %semana/hora (1 semana = 5 días; 1 día 16 horas)
    end
    ft;
    global ftime;
    ftime = ft;
    % Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu3 contents as cell
    array
    %     contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu3
    % --- Executes during object creation, after setting all properties.
    function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    % hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
    % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
    % handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
contenido2 = get(hObject,'String'); %ALGORITMO PARA MENU POP-
UP
z2=get(hObject,'value');
texto2= contenido2(z2);
switch cell2mat(texto2);
    case '20'
        Ptime = 20;

    case '1'
        Ptime = 1;
end
Ptime;
global Ptiempo
Ptiempo=Ptime;
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2 contents as cell
array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu2
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in popupmenu4.
function popupmenu4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu4 contents as cell
array
%      contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu4
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to popupmenu4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function A0_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to A0 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of A0 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of A0 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function A0_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to A0 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function escala_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to escala (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of escala as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of escala as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function escala_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject  handle to escala (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles  empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%-----
% Cargar imagen en formato JPG
try
[filename,pathname] = uigetfile('*.jpg','Selecciona imagen para abrir'); % CARGAR
IMAGEN
if isequal(filename,0)
    %Do nothing yet
else
    handles.myImage = imread(fullfile(pathname, filename));
image(handles.myImage, 'Parent', handles.axes1);
end
guidata(hObject, handles);
catch
msgbox('Error')
end
function Tfo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Tfo (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Tfo as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Tfo as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Tfo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Tfo (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%-----
%Punto fuente
[isox, isoy] = ginput(1);
line(isox, isoy, 'color', 'r', 'marker', 'o', 'LineWidth', 3);
global xpoint ypoint;
xpoint = isox(1);
ypoint = isoy(1);
% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%-----
%Redimensionar la imagen de pixeles a metros
hImg = image(handles.myImage, 'Parent', handles.axes1);
redimension = str2double(get(handles.fescala, 'String'));
XDatanMeters = get(hImg, 'XData') * redimension;
YDatanMeters = get(hImg, 'YData') * redimension;
%
set(hImg, 'XData', XDatanMeters, 'YData', YDatanMeters);
set(gca, 'XLim', XDatanMeters, 'YLim', YDatanMeters);
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
scale = str2double(get(handles.escala, 'String'));
[xe, ye] = ginput(2);
line(xe, ye, 'color', 'r', 'marker', 'o', 'LineWidth', 2);
re = ((xe(1) - xe(2))^2 + (ye(1) - ye(2))^2)^.5;
factor = scale / re;
set(handles.fescala, 'String', factor);
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Definicion del punto de la herramienta
global xpoint ypoint;

```

```

h = impoint(gca);
% Actualización de la posición en el título usando newPositionCallback
addNewPositionCallback(h,@(h) title(sprintf('%1.1f,%1.1f',(xpoint-h(1)),(ypoint-
h(2)))));
% Construcción función restricción límite
fcn = makeConstrainToRectFcn('impoint',get(gca,'XLim'),get(gca,'YLim'));
% Se hace cumplir la función de restricción de límite usando
setPositionConstraintFcn
setPositionConstraintFcn(h,fcn);
setColor(h,'b');
setString(h,'Punto');
% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Definición de la distancia de la herramienta
hdist=imdistline(gca)
setLabelTextFormatter(hdist,'%01.2f m');
% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
[xpunto,ypunto] = ginput(1);
line(xpunto,ypunto,'color','r','marker','s','LineWidth',2);
% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%----- DEFINICION DE EL PUNTO DE CALCULO -----
global xpoint ypoint xr yr;
[xcal,ycal] = ginput(1);
line(xcal,ycal,'color','b','marker','o','LineWidth',2)
xr=xcal(1);
yr=ycal(1);
%global xr yr;
%----- CALCULO DE LA DISTANCIA -----
global r2
r2=(((xr(1)-xpoint(1)))^2)+(((yr(1)-ypoint(1)))^2);
%----- DATOS GENERALES -----
%DATOS DEL PLOMO
TVL_pb1 = 2.31;    %TVL 1 en cm

```

```

TVL_pbe = 2.05;    %TVL equilibrio en cm
%DATOS DEL CONCRETO
TVL_conc1 = 21.4;  %TVL 1 en cm
TVL_conce = 16.1; %TVL equilibrio en cm
%DATOS DEL Acero
TVL_acero1 = 6.25; %TVL 1 en cm
TVL_aceroe = 4.77; %TVL equilibrio en cm
%----- FACTOR DE OCUPACION -----
T = str2double(get(handles.Tfo,'String')); % Llamo el factor de ocupacion
introducido
%----- ACTIVIDAD DE LA FUENTE -----
Act = str2double(get(handles.A0,'String')); % Llamo la actividad introducida
%----- CALCULOS GENERALES -----
global fgamma Ptiempo GA B FC xconc;
L1 = 'mSv/año';
fcd = 1.20; %Factor de conversion H*(10)/Ka

    GA=(fcd*fgamma)*Act;
    set(handles.unidad,'String',L1);
PT=(Ptiempo)/T;
    set(handles.limitedesing,'String',PT);
%format bank
% upb=interp1(E_pb,urho_pb,E); %Coeficiente de atenuación para la energía dada

% u_pb = upb*dens_pb; %Coeficiente lineal de atenuación

% x0 =(-1/u_pb)*log((r2*PT)/GA); % espesor inicial

%final = 'NO REQUIERE BLINDAJE.';
%if x0 < 0
% set(handles.no,'String',final);
%end
%-----CALCULO TASA SIN BLINDAJE-----
%Horas a años: 1 año = 50 sem; 1 sem = 7 dias; 1 dia = 24 h
fha = 8400; %h/año
FC = 0.84; %mSv/mSv Factor de conversion de E/H*(10)
H0 = (FC*GA*fha)/r2; %Tasa de dosis sin blindaje en mSv/año
%-----CALCULO DE LA TRANSMISION-----
B = PT/H0;
%-----CALCULO DEL NUMERO DE TVL-----
n_tvl=-log10(B);
%----- CALCULO CONCRETO -----
xpb = TVL_pb1+((n_tvl-1)*TVL_pbe);
set(handles.xplomo,'String',xpb);

```

```

%----- CALCULO CONCRETO -----
xconc = TVL_conc1+((n_tv1-1)*TVL_conce);
set(handles.xconcreto,'String',xconc);
%----- CALCULO ACERO -----
xacero = TVL_acero1+((n_tv1-1)*TVL_aceroe);
set(handles.xhierro,'String',xacero);
% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%----- DATOS GENERALES -----
%DATOS DEL CONCRETO
TVL_conc1 = 21.4; %TVL 1 en cm
TVL_conce = 16.1; %TVL equilibrio en cm
%-----CALCULO DE PUNTOS DE EVALUACION -----
global xpoint ypoint GA B FC NormaP1Ex espesor_con PT_losa;
S1 = 'mSv/año';
set(handles.leyenda,'String',S1);
%----- CAPTURAR Y PROCESAR PUNTO -----
[xdos1,ydos1] = ginput(1);

line(xdos1,ydos1,'color','g','marker','o','LineWidth',2);
NormaP1Ex = (((xdos1(1)-xpoint)^2)+((ydos1(1)-ypoint)^2)); %Norma del vector
P1E
% CALCULAR ESPESOR DE LA LOSA
fha2 = 4500.0; % h/año para 1 dia = 15 h y 1 semana = 6 dias
T2 = str2double(get(handles.tlosa,'String'));
P2 = str2double(get(handles.limite2,'String'));
PT_losa = P2/T2;
set(handles.ptlosa,'String',PT_losa);
%CONCRETO
H_con = ((FC*GA*fha2)/NormaP1Ex)*B;
n_tv1_con = -log10((PT_losa)/H_con);
espesor_con = TVL_conc1+((n_tv1_con-1)*TVL_conce);
set(handles.espesor2,'String',espesor_con);
% --- Executes on button press in pushbutton10.
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%----- DATOS GENERALES -----
%DATOS DEL CONCRETO
TVL_conc1 = 21.4; %TVL 1 en cm

```

```

TVL_conce = 16.1; %TVL equilibrio en cm
%-----CALCULO DE PUNTOS DE EVALUACION -----
global xpoint ypoint xr yr GA FC ;
S1 = 'mSv/año';
set(handles.leyenda,'String',S1);
%----- CAPTURAR Y PROCESAR PUNTO -----
[xdose1,ydose1] = ginput(1);
line(xdose1,ydose1,'color','m','marker','o','LineWidth',2);
P1C = [xr-xpoint yr-ypoint]; %Vector punto calculo
P1E = [xdose1(1)-xpoint ydose1(1)-ypoint]; %Vector punto de evaluacion
prodpunto1 = dot(P1C,P1E); %Producto punto
NormaP1C = (((xr-xpoint)^2)+((yr-ypoint)^2))^0.5; %Norma del vector P1C
NormaP1E = (((xdose1(1)-xpoint)^2)+((ydose1(1)-ypoint)^2))^0.5; %Norma del
vector P1E

angrad1 = acos((prodpunto1)/(NormaP1C*NormaP1E)); %Angulo entre los
vectores en radianes
angulo1 = angrad1*(180/pi()); %Angulo entre los vectores en grados
%----CALCULO PARA EL CONCRETO----
xcon_cal = str2double(get(handles.espesor2,'String'));
xpe_con = xcon_cal/cos((pi()*angulo1/180));
te_con = str2double(get(handles.xconcreto,'String'));
te = te_con/cos((pi()*angulo1/180));
% CALCULAR H A PARTIR DEL ESPESOR OBLICUO
fha2 = 4500.0; % h/año para 1 dia = 15 h y 1 semana = 6 dias
%CONCRETO
t1 = te-TVL_conc1;
B_obl1 = 10^(-(1+(t1/TVL_conce)));
t2 = xpe_con-TVL_conc1;
B_obl2 = 10^(-(1+(t2/TVL_conce)));
H_c = ((FC*GA*fha2)/NormaP1E^2)*B_obl1*B_obl2;
set(handles.pxconcreto0,'String',H_c);
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

```

```

% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in point1y2.
function point1y2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to point1y2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global lmax r2 xconc NormaP1Ex espesor_con xang;
[xdim,yfim] = ginput(2);
line(xdim,yfim,'color','r','marker','X','LineWidth',3);
rdim =((xdim(1)-xdim(2))^2+(yfim(1)-yfim(2))^2)^.5;
lmax = 0.5*rdim;
xang=sqrt(r2)-0.5;
ang_max = (180/pi()*atan((lmax/xang)));
set(handles.point12,'String',rdim);
global angulo_max x_tapa dist_cal x_losa ;
angulo_max = ang_max;
x_tapa = xconc ;
dist_cal = NormaP1Ex ;
x_losa = espesor_con ;

```

MENÚ

```
function varargout = MENU(varargin)
% MENU MATLAB code for MENU.fig
%   MENU, by itself, creates a new MENU or raises the existing
%   singleton*.
%   H = MENU returns the handle to a new MENU or the handle to
%   the existing singleton*.
%   MENU('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in MENU.M with the given input arguments.
%   MENU('Property','Value',...) creates a new MENU or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before MENU_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to MENU_OpeningFcn via varargin.
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help MENU
% Last Modified by GUIDE v2.5 30-Jul-2018 12:18:21
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @MENU_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @MENU_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before MENU is made visible.
function MENU_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to MENU (see VARARGIN)
% Choose default command line output for MENU
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes MENU wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = MENU_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

FORMALISMO_TRANSMISION

```
% --- Executes on button press in pushbutton6.  
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

ANALISIS_BLINDAJE

```
% --- Executes on button press in pushbutton7.  
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% hObject    handle to pushbutton7 (see GCBO)  
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso García, L., & Núñez Vásquez, A. (2014). *Reestructuración de una sala de de Rayos X con base a la normativa oficial*. México Df.
- Attix, F. H. (2004). *Introduction to radiological physic and radiation dosimetry*. Alemania: Wiley-Vch.
- Ballester, F., Baltas, D., Gimeno, J., Granero, D., Perez-Cataluya, J., Papagiannis, D., & Venselaar, L. (s.f.). Radiation transmission data for radionuclides and materials relevant to brachytherapy facility shielding. *Med. Phys* 35, 4898-4906.
- BENINSON, D. (1995). *Potential Exposures Symposium "On the Implementation of the New Basic Safety Standards" (ICRP - 60) IAEA*. Viena, Austria: Norma Básica de Seguridad Radiológica. Autoridad Regulatoria argentina. .
- Brosed, A. (2011). *Fundamentos de Física Médica*. Madrid: ADI.
- Brosed, A. (2011). *Fundamentos de Física Médica*. Madrid: ADI.
- C, P. (2003). *MATLAB y sus aplicaciones en las ciencias y la ingienería* . Mdrid, España: Pearson.
- Corral, J. R. (2015). *DETERMINACIÓN DE LA RAPIDEZ DE EXPOSICIÓN DE LA RADIACIÓN EMITIDA POR EL ACELERADOR LINEAL, UTILIZANDO EL CÓDIGO MCNP5, PARA EVALUAR LOS BLINDAJES DE LA SALA DE RADIOTERAPIA DEL HOSPITAL ABC* . CD. OBREGÓN, SONORA .
- Costa , P. R., & Hoff, G. (2013). A comparative study for different shielding material composition and beam geometry applied to PET facilities: simulated transmission curves. *Engenharia Biomedica, Volume 29*, 11.
- Costa R, P., & Caldas, L. (2001). Evaluation of protective shielding thickness for diagnostic radiology rooms: Theory and computer simulation. *Medical Physics, Vol.29*, 13.
- IAEA. (2005). *Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos*. Viena: OIEA en Austria.
- IAEA. (2006). *Exámen de la seguridad nuclear correspondiente al año 2005*. Austria: Gc(50)/INF/2.
- IAEA. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Vienna: IAEA.
- ICRP. (1977). Publication 26. *"Recommendations of the International Commission on Radiological Protection"*.

- ICRP. (2007). Publicación 103. *“Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”*.
- ICRP publication 116. (2010). Conversion Coefficient for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. *The International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP 40 (2-5)*.
- ICRP publication 74. (1996). Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. *The International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP 26 (3-4)*.
- ICRU. (1980). Reporte 33. *Radiation Quantities and Units*.
- ICRU REPORT No. 58. (1997). *Dose and volumen Specification for Reporting Interstitial Therapy*. Washington DC: International Commission on Radiation Units and Measurements.
- Lopez, D. (2006). *MATLAB con aplicaciones a la ingeniería física y finanzas*. México DF: Alfaomega.
- Martin, J. E. (2006). *Physics for Radiation Protection*. Alemania: Wiley-Vch.
- NCRP REPORT No.151. (2005). *Structural Shielding Desing and Evaluation for Megavoltage X-and gamma-Ray Radiotherapy Facilities*. . USA: Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements.
- Vega, C. G. (Noviembre de 2009). Doctorado en tecnología avanzada . *Simulación de la interacción de fotones en la materia usando el método de Monte Carlo*. México D.F, México.
- Yanchapanta, V. (2013). *Cálculo de blindaje para el acelerador lineal monoenergetico del instituto de cáncer solca- núcleo de Loja*. Ecuador.

ANEXOS



Ilustración 22. Menú inicial donde nos muestra los botones que despliegan cada cálculo de nuestro programa

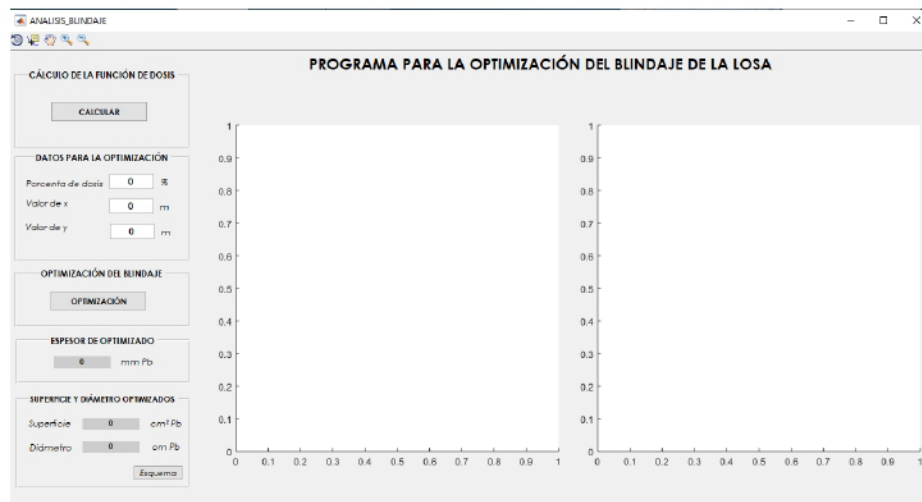


Ilustración 23. Cálculo de la optimización de la losa de nuestro depósito de fuentes radiactivas

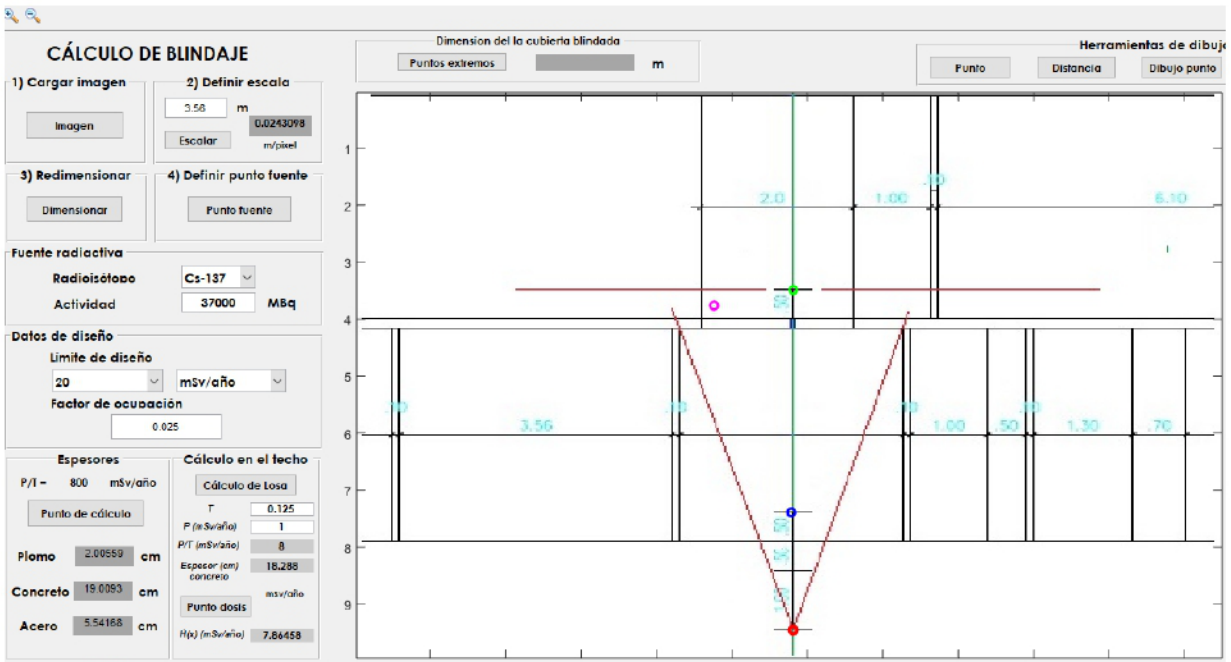


Ilustración 24. Pantalla para el cálculo de blindaje donde se muestran paso a paso los datos que debemos ingresar al programa para obtener nuestro resultado. Punto rojo donde se coloca la fuente radiactiva, punto azul representa punto de cálculo para determinar el espesor que necesita nuestro blindaje, punto verde es el cálculo del techo se colocan los valores de factor de ocupación (T) y límite de diseño (P) para el cálculo de la losa y el punto rosado es para evaluar cualquier punto por encima de la losa