



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA

UNAN - MANAGUA

RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO (RURD)

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Trabajo Monográfico para optar al título de:

Licenciatura en Física con mención en Física Médica

Título:

Apertura del nuevo servicio dosimétrico en magnitud Hp (3), con dosímetros termoluminiscentes MCP-N, utilizando las normas IEC 62387:2012 e ISO 4037-3:2019, Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM), septiembre 2019 - noviembre 2020

Autora:

Bra. Josselyn Suyen Mendoza Corea

Tutor:

MSc. Andrea Marcela Castillo Arias

Asesor Metodológico:

Sp. José Luis Prado Arróliga

Managua, noviembre, 2020

Dedicatoria

A Dios:

Por ser mi guía y pilar principal en todo momento.

A mi familia:

Por brindarme su apoyo incondicional y darme fortaleza para seguir adelante.

A las personas que me han apoyado:

Por brindarme la motivación y un increíble deseo de superación a través de sus consejos y ejemplos de vida.

Agradecimiento

A Dios:

Por todas las bendiciones que me ha dado y haberme permitido llegar tan lejos venciendo las dificultades.

A mi familia:

Por su apoyo económico y sus consejos de aliento para poder alcanzar mis metas.

Al Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología:

Por su invaluable apoyo, asesoramiento científico y práctico que me brindaron durante el desarrollo del trabajo.

Carta aval del tutor

Managua, 25 de noviembre de 2020

PhD. Noel Antonio Zelaya Vanegas
Director del Departamento de Física
Facultad de Ciencias e Ingeniería
UNAN-Managua

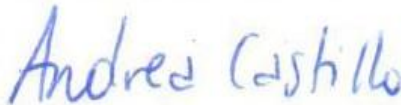
Estimado Doctor Zelaya:

Por este medio, remito a Usted tres juegos del informe de Monografía correspondiente al II Semestre 2020, con tema "Apertura del nuevo servicio dosimétrico en magnitud Hp (3), con dosímetros termoluminiscentes MCP-N, utilizando las normas IEC 62387:2012 e ISO 4037-3:2019, Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM), septiembre 2019 - noviembre 2020".

Dicho trabajo es presentado la bachillera Josselyn Suyen Mendoza Corea con número de carné:12-0130-02 para optar al título de Licenciado en Física con Mención en Física Médica. Dicho trabajo cuenta con la asesoría metodológica del maestro especialista Sp. José Luis Prado Arróliga.

Este trabajo reúne los requisitos establecidos REGLAMENTO ACADEMICO, Capítulo III, formas de culminación de los estudios Arto. 43 al Arto. 61. Trabajo Monográfico.

Sin más que agregar, me despido cordialmente



MSc. Andrea Marcela Castillo Arias
Docente del Departamento de Física
Tutor de Monografía
UNAN-Managua

Resumen

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos de la calibración y verificación del desempeño del sistema dosimétrico en el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (LAF-RAM) en el periodo de septiembre 2019 - noviembre 2020, con dosímetros termoluminiscentes MCP-N y lector dosimétrico RADOS 2000, para el monitoreo de la dosis equivalente en cristalino Hp(3). Se utilizó el maniquí cilíndrico propuesto en la ISO 4037-3:2019 el cual fue fabricado localmente específicamente para esta investigación. Las pruebas tipo se realizaron siguiendo lo planteado en la IEC 62387:2012. Las pruebas desarrolladas son coeficiente de variación, no linealidad de la respuesta, exposición a la luz, caída del dosímetro, sobre respuesta a la incidencia de radiación, dosímetros a 180° y fading. Los cumplimientos de los requisitos en general son satisfactorios, excepto en una de las condiciones temporales del fading. La estimación de la incertidumbre del sistema se calculó para todo el rango de medición con una incertidumbre Expandida máxima de 20%, el punto de dosis en Hp(3) de 100 μ Sv. La caracterización en general del sistema en esta magnitud permitirá prestar el servicio de monitoreo de los trabajadores expuestos en las salas de intervencionismo en el país con disponibilidad de 357 dosímetros para campo.

Índice general

Dedicatoria	2
Agradecimiento	3
Carta aval del tutor.....	4
Resumen.....	5
Abreviaturas	11
CAPÍTULO I.....	12
1.1 Introducción	13
1.2 Planteamiento del problema	15
1.3 Justificación.....	16
1.4 Objetivo General:	17
1.4.1 Objetivos específicos:	17
CAPITULO II	18
2.1 Marco Referencial	19
2.1.1 Antecedentes	19
2.1.1.1 Internacional	19
2.1.1.2 Nacional.....	20
2.2 Marco teórico	22
2.2.1 Magnitudes Dosimétricas	22
2.2.1.1 Dosis Absorbida.....	22
2.2.3 Magnitudes limitadoras	23
2.2.3.1 Dosis equivalente en un órgano <i>HT</i>	23
2.2.3.2 Dosis efectiva E.....	23
2.2.4 Magnitudes Operacionales	24
2.2.4.1 Equivalente de dosis personal en profundidad, $H_p(d)$	24
2.2.5 Dosímetros Termoluminiscentes	25
2.2.6 Curvas de Brillo (Curva Glow) y material TL	26
2.2.7 Condiciones de calibración ISO 4037-3:2019 y pruebas de desempeño según la IEC 62387:2012.....	28
2.2.7.1 Coeficiente de Variación	30
2.2.7.2 No linealidad	31
2.2.7.3 Exposición a la luz (lector).....	31

2.2.7.4 Umbral de detección	31
2.2.7.5 Caída de dosímetro	32
2.2.7.6 Sobre respuesta a la incidencia de radiación	32
2.2.7.7 Colocación incorrecta del dosímetro (Dosímetros a 180°)	32
2.2.7.8 Build up, (fading), auto irradiación y respuesta a la radiación natural (para dosímetros).	33
2.2.8 Incertidumbre	33
2.2.8.1 Modelo matemático.....	34
2.2.8.2 Identificación de las fuentes de incertidumbre	34
2.2.8.3 Evaluación tipo A de la incertidumbre de medida:	35
2.2.8.4 Evaluación tipo B de la incertidumbre de medida:	36
Incertidumbre combinada.....	38
Incertidumbre expandida.....	39
2.2.9 Marco legal.....	40
2.3 Hipótesis.....	42
CAPITULO III.....	43
3.1 Diseño metodológico.....	44
3.1.1 Tipo de Estudio	44
3.1.1.1 Universo	44
3.1.1.2 Muestra	44
3.1.2 Operacionalización de variables.....	45
3.1.2.1 Identificación de las variables	45
3.1.3 Equipos e instrumentos	47
3.1.4 Localización geográfica	51
3.1.5 Procedimientos.....	52
3.1.5.1 Calibración de dosis cero.....	52
3.1.5.2 Calibración de la sensibilidad del lector.....	52
3.1.5.3 Calibración de sensibilidad individual	53
3.1.5.4 Calibración del factor del sistema dosimétrico.....	53
3.1.5.5 Linealidad con fuente de radiación beta (β) para comprobación del factor de calibración del sistema dosimétrico.....	53
3.1.6 Pruebas tipo	54

3.1.6.1 Caída de dosímetro	54
3.1.6.2 Cálculo del umbral de detección	54
3.1.6.3 No Linealidad con fuente de radiación gamma (γ)	55
3.1.6.4 Coeficiente de Variación	55
3.1.6.5 Sobre respuesta a la incidencia de radiación	55
3.1.6.5 Exposición a la Luz (INFLUENCIA SOBRE EL LECTOR)	56
3.1.6.7 Colocación incorrecta del dosímetro (Dosímetros a 180°)	56
3.1.6.8 Fading	56
3.1.6.9 Prueba de Energía de radiación y ángulo de incidencia (radiación de fotones)	57
3.1.7 Estimación de la incertidumbre	58
CAPITULO IV	59
4.1 Análisis y discusión de los resultados	60
4.1.2 Calibración del sistema dosimétrico	60
4.1.3 Verificación del valor del factor de irradiación con fuente de radiación beta (β) mediante la linealidad de la respuesta	61
4.1.4 Resultados de calibración de dosímetros para campo	62
4.1.4 Pruebas Tipo	64
4.1.4.1 No Linealidad	64
4.1.4.2 Coeficiente de Variación	65
4.1.4.3 Umbral de detección	67
4.1.4.4 Prueba de Caída del dosímetro	68
4.1.4.5 Exposición a la Luz (INFLUENCIA SOBRE EL LECTOR)	69
4.1.4.6 Sobre respuesta a la incidencia de radiación	70
4.1.4.7 Dosímetros a 180°	70
4.1.4.8 Build up, desvanecimiento (fading), auto irradiación y respuesta a la radiación natural (dosímetro)	71
4.1.5 Estimación de la Incertidumbre para el rango de medición.	73
CAPITULO V	76
5.1 Conclusión	77
5.2 Recomendaciones	78
5.3 Bibliografía	79
5.4 Anexo	83

Índice de tablas

Tabla 1: Operacionalización de variables.....	46
Tabla 2: Equipos para procesar información.....	47
Tabla 3: Sistema de medida	48
Tabla 4: Instrumentos utilizados para la calibración.....	49
Tabla 5: Comparación de dosímetros irradiados en maniquí cilíndrico e irradiados en maniquí de tronco	61
Tabla 6: Verificación del valor del factor de irradiación	61
Tabla 7 Resultados de la caracterización de dosis cero y sensibilidad individual.....	63
Tabla 8: Resultados de prueba de Linealidad	64
Tabla 9: Resultados de la prueba de Coeficiente de Variación.....	66
Tabla 10: Resultados de determinación de la prueba de Umbral de detección.....	67
Tabla 11: Resultados de prueba de caída.	68
Tabla 12: Resultados de los dosímetros expuestos a la luz.	69
Tabla 13: Resultados de la prueba sobre respuesta a la incidencia de radiación desde 0° hasta 120°.	70
Tabla 14: Resultado de la prueba de Grupo de dosímetros a 180°	71
Tabla 15: Resultados de Grupo 1 – 3 magnitudes de influencia tipo F.....	72
Tabla 16: Resultados de Grupo 4´ de influencia tipo F	72
Tabla 17: Resultados de Grupo 1 – 3 magnitudes de influencia tipo S.....	72
Tabla 18: Resultados de Grupo 4´ de influencia tipo S	72
Tabla 19: Resultados de la estimación de la incertidumbre para todo el rango de medición.....	73
Tabla 20 Cálculo del Background	74
Tabla 21 - Requisitos de funcionamiento para dosímetros Hp (3)	83
Tabla 22 - Coeficiente de conversión recomendado $H_{pK}(3; S, \alpha)_{cyl}$ de kerma en aire, K_a , a la dosis equivalente $H_p(3)$ para el maniquí de cilindro que consta de tejido ICRU	84
Tabla 23: Valores de C1 y C2 para w valores diferentes de dosis y n indicaciones para cada valor de dosis. (Tomado de la norma IEC 62387 (2012)).....	84
Tabla 24: Presupuesto de Incertidumbre para 300 μ Sv.....	85

Índice de Figuras

Figura 2.1. Modelo simplificado del principio de funcionamiento de termoluminiscencia. Tomada y editada de (AAPM, 2020)	26
Figura 2.2 Curva de brillo y respuesta a la dosis MCP-N tomada de (GmbH, RadPro International, s.f.) www.radpro-int.com	27
Figura 2.3 Principio de medición con sistema RADOS TLD.	28
Figura 3.1 Office Excel 2013	47
Figura 3.2 TLDEplorer	47
Figura 3.3 TLDServer	47
Figura 3.6 IR 2000 Fast 90Sr Irradiador	48
Figura 3.5 Generador de Nitrógeno	48
Figura 3.4 RE 2000 Readers.....	48
figura 3.7 (RADOS RadPro International GmbH.).....	49
figura 3.8 (RADOS RadPro International GmbH.).....	49
figura 3.9 (fuente propia).....	49
figura 3.10 (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD).....	50
figura 3.11 (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD).....	50
figura 3.12 (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD).....	50
Figura 3.14 Vista satelital de la ubicación del LAF-RAM	51
Figura 3.15: Montaje de irradiación de dosímetros en el LCD del LAF-RAM.	53
Figura 3.16 prueba de caída de dosímetro	54
Figura 3.17 montajes de prueba de dosímetros irradiados libres en aire a distintos ángulos	55
Figura 3.19 prueba de exposición a la luz del lector	56
Figura 3.21 dosímetros de referencia irradiados a 0° (posición normal).....	56
Figura 3.20 prueba de dosímetros irradiados a 180° (colocación incorrecta del dosímetro)	56
Figura 3.22 Respuesta energética de EYE-D™ tomada de (Radcard) www.radcard.pl	57
Figura 3.23 presupuesto de incertidumbre.....	58
Figura 4.1 dosímetros irradiados en maniquí cilíndrico.....	60
Figura 4.2 dosímetros irradiados en maniquí de tronco.....	60
Figura 4.3 de los resultados del Coeficiente de Variación	66
Figura 4.4: Resultados del cálculo del background	75
Figura 5.1: Lector dosimétrico marca Rados modelo RE 2000	83

Abreviaturas

LAF-RAM: Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología.

LCD: Laboratorio de Calibración Dosimétrica.

LDE: Laboratorio de Dosimetría Externa.

PMMA: Polimetilmetacrilato.

ORAMED: Optimización de Protección Radiológica del Personal Médico.

Norma ISO: Norma definida por la Organización Internacional de Normalización que se aplica a los productos y servicios.

ICRU: Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiológicas.

IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.

ICRP: Comisión Internacional de Protección Radiológica.

TOE: Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos.

IAEA: El Organismo Internacional de Energía Atómica

TLD: Detectores Termoluminiscentes.

TL: Termoluminiscente.

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés) en 1990 declaró en sus recomendaciones umbrales de dosis para la aparición de “opacidades detectables” en los siguientes escenarios: 0,5 - 2,0Sv para exposiciones únicas y breves, dosis equivalentes totales de 5Sv en los casos de exposiciones muy fraccionadas o prolongadas. Además, establece un límite de dosis ocupacional de 150 mSv al año (ICRP(publicación60), 1990); sin embargo a través de un estudio realizado por el OIEA en 2008 a nivel internacional llamado RELID (Evaluación Retrospectiva de las Lesiones del cristalino y de las Dosis). Se ha llevado a cabo una serie de exámenes de prueba dirigidos al personal que trabajan en las salas de radiología intervencionista, se encontró alteraciones en el cristalino con un umbral en relación entre dosis y efecto, el cual es significativamente inferior a 1 Gy. Debido a esto, la ICRP en su comunicado del 21 de abril de 2011 declara que el umbral de dosis absorbida en el cristalino del ojo será actualmente de 0,5 Gy y establece un límite de dosis ocupacional de 20mSv al año para los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE). (ICRP118, 2011) (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2013)

Por lo antes expuesto es necesaria una dosimetría específica para vigilar estas dosis y compararla con los límites establecidos, las cuales estén acorde con la situación de exposición o práctica.

El personal que trabaja realizando estudios de intervencionismo, por ejemplo, requiere monitoreo de dosis en cristalino por ser un órgano sensible con riesgo a efecto determinista¹. En este sentido, anteriormente se han realizado esfuerzos a nivel nacional para el monitoreo del mismo, sin embargo, en la actualidad aún no se realiza la dosimetría para evaluar la dosis en cristalino.

¹ *Efectos deterministas*: Las reacciones tisulares se producen cuando la dosis sobrepasa un determinado valor umbral. La formación de cataratas es un ejemplo de tales reacciones. (International Atomic Energy Agency IAEA, 2013)

Actualmente en Nicaragua el LAF-RAM es el único prestador del servicio de dosimetría externa a nivel nacional, cuyo alcance para TOE es la medida de dosis equivalente personal en la magnitud $H_p(10)$ para cuerpo entero y $H_p(0,07)$ para extremidades (LAF-RAM, 2019).

En el caso del monitoreo de la dosis equivalente personal en cristalino se realiza a través de la estimación de la magnitud $H_p(3)$. Sin embargo, el LAF-RAM no cuenta con la calibración actualizada de acuerdo con los estándares internacionales recientemente publicados en el año 2019.

El propósito de este estudio es la calibración de un lote de dosímetros termoluminiscentes para el monitoreo de la dosis equivalente en cristalino $H_p(3)$ utilizando detectores MCP-N y un lector dosimétrico RADOS 2000.

La caracterización en general del sistema dosimétrico termoluminiscente en esta magnitud permitirá que el LAF-RAM pueda brindar el servicio de monitoreo de los trabajadores expuestos en las salas de intervencionismo en el país.

1.2 Planteamiento del problema

Desde la década de los años 90 la preocupación por las dosis ocupacionales a cristalino ha ido en aumento debido a los informes cada vez más frecuentes de efectos determinísticos como presencia de cataratas y opacidades en médicos y enfermeras de los departamentos de radiología intervencionista y cardiología. (Palop, 2016).

Por otro lado, en 2012 es emitida la IEC 62387:2012 norma de Instrumentación de protección radiológica: sistemas de dosimetría integradores pasivos para el monitoreo personal y ambiental de fotones y radiación beta para pruebas de desempeño de detectores termoluminiscentes. La ISO 4037-3: 2019 norma de Protección radiológica - Radiación de referencia X y gamma para calibrar dosímetros y medidores de tasa de dosis y para determinar su respuesta en función de la energía fotónica - Parte 3: Calibración de dosímetros de área y personales y la medición de su respuesta como función de energía y ángulo de incidencia, establece requisitos específicos para calibrar dosímetros personales Hp(3), donde se introduce el uso de un maniquí cilíndrico simulador de cabeza.

Por lo antes expuesto se genera la necesidad de actualizar el sistema dosimétrico del LAF-RAM a dichas normas, con la adquisición de un maniquí estándar, así como con la caracterización y verificación de desempeño de un lote de dosímetros en Hp(3). Este trabajo busca ampliar y cubrir la demanda del servicio de dosimetría como parte de la vigilancia radiológica de los TOE que lo requieren.

Sin un método para mantener la vigilancia radiológica sobre los TOE que requieren monitoreo de dosimetría en cristalino, ¿Cómo será posible saber cuánta dosis de radiación están recibiendo en este órgano y, por lo tanto, saber el potencial daño al que están siendo expuestos en la realización de sus labores?

1.3 Justificación

El LAF-RAM ha desarrollado dos investigaciones relacionadas al monitoreo de dosis en cristalino en la magnitud $H_p(3)$, estas se realizaron siguiendo los procedimientos y pruebas planteadas en las normativas anteriores de dosimetría, estas investigaciones se describen en una sección posterior en este trabajo.

La caracterización del sistema dosimétrico en magnitud $H_p(3)$ con las normativas actuales de dosimetría incrementa las capacidades científico-técnicas y permite al LAF-RAM que permite estandarizarse en procesos de intercomparaciones regionales, así como dar respuesta a la demanda existente y a la normativa nacional como prestador de servicio. Reconociendo, además, que el laboratorio cuenta tanto con el equipamiento adecuado, la experiencia técnica y profesional, bibliografía actualizada y homogeneizada con la región y el personal calificado, para la debida vigilancia radiológica individual en cristalino a los trabajadores expuestos a Rayos X en las salas de intervencionismo.

1.4 Objetivo General:

Apertura del nuevo servicio dosimétrico en magnitud Hp(3), con dosímetros termoluminiscentes MCP-N, utilizando las normas IEC 62387:2012 e ISO 4037-3:2019 en el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología, periodo septiembre 2019 - noviembre 2020.

1.4.1 Objetivos específicos:

1. Caracterizar un lote de dosímetros a través de asignación de sensibilidad de dosis cero e individual para dosímetros de campo.
2. Realizar la calibración del factor del sistema dosimétrico utilizando una fuente de referencia de ^{137}Cs y el maniquí fabricado localmente, siguiendo lo indicado en la ISO 4037-3:2019.
3. Verificar el desempeño del sistema dosimétrico siguiendo las pruebas tipo de la IEC 62387:2012 (coeficiente de variación, no linealidad de la respuesta, exposición a la luz, fading, dosímetros a 180° , sobre respuesta a la incidencia de radiación y caída del dosímetro).

CAPITULO II

2.1 Marco Referencial

2.1.1 Antecedentes

En el reporte 118 de la ICRP se reconoce resultados de estudios epidemiológicos llevados a cabo por Nakashima et al., Worgul et al., Chodick et al., que muestran casos de cataratas en trabajadores del sector médico con clara afectación de tejidos. Dichos resultados sugieren reconsiderar el uso de dosímetros dedicados para la determinación de las dosis equivalente personal Hp(3). (ICRP118, 2011)

Por otro lado, Bordy en 2015, Francia plantea los problemas generales luego de la emisión de las recomendaciones de la ICRP 118 en términos de la elección y definición de la magnitud operativa a utilizar para dosimetría de cristalino. Como una de las primeras instancias, la definición apropiada magnitud operacional conlleva a las condiciones de uso, es decir el diseño del dispositivo y por tanto a las pruebas de desempeño y calibración del sistema. En este sentido, concluye que no es confiable utilizar estimaciones de resultados en dosímetros de cuerpo entero para estimar exposición en cristalino por tanto propone un índice para decidir cuándo utilizar un dosímetro ocular y cuando es posible aplicar estimación de Hp(3) con dosímetro de cuerpo entero (Bordy, 2015).

2.1.1.1 Internacional

Pirchio en 2010, Argentina, en un estudio dosimétrico del cristalino utiliza dosímetros termoluminiscentes (TLD por sus siglas en inglés) que fueron calibrados en el Laboratorio Secundario Standard de Dosimetría (SSDL) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en términos de Hp(10) y Hp(3) en calidad W80 ISO 4037-1, energía efectiva 57 keV (ISO 1997) y usando un equipo Siemens de rayos-X Stabilipan 300. Para Hp(10), se utilizó un maniquí de agua ISO definido en ISO 4037-3, mientras que para Hp(3), se utilizó un maniquí nuevo cilíndrico de 20 cm de altura y 20 cm de diámetro, como se sugirió en el proyecto Optimización de Protección Radiológica del Personal Médico (ORAMED). Se encontró que se presentó una mejor estimación de dosis en cristalino con dosímetros Hp(3) en comparación con la aproximación entre dosímetros Hp(10) y estimación de dosis en tiroides. (Pirchio, 2010)

Por otro lado, Fernández y García, en México 2015 en su trabajo titulado Comportamiento dosimétrico de dosímetros termoluminiscentes a bajas dosis en Radiodiagnóstico realizan la caracterización de lotes de dosímetros de diferentes materiales como TLD-100 (Harshaw Chemical Company, Solon, USA), MCP-N (LiF:Mg,Cu,P) los cuales son detectores de Fluoruro de litio dopado con magnesio, cobre y fósforo, (MIKROLAB s.c., Polonia) y CaSO₄ (CICATA-Legaria). A partir de las pruebas dosimétricas de homogeneidad del lote, reproducibilidad, umbral de detección, linealidad y pérdida de información en función del tiempo, se hace una comparación del comportamiento de cada material, obteniendo que el MCP-N presenta mayor sensibilidad para captar bajas dosis. (S.del Sol Fernández, 2015)

En el año 2017 Altaf et al., Egipto realizan la calibración de un sistema dosimétrico Harshaw con TLD tipo MCP-N para dosis personal equivalente en profundidad de 3 mm. En este estudio la calibración es en un amplio rango de energía de rayos X; utilizando un maniquí de polimetilmetacrilato (PMMA) de 20 cm × 20 cm × 1,2 cm, el objetivo de este estudio fue calibrar el soporte EYE-DTM con detectores PTW MCP-N (LiF: Mg, Cu, P) para dosis equivalente personal en el cristalino. (Altaf, 2017)

2.1.1.2 Nacional

En 2014, Hurtado y Pasos, en Managua realizaron la primera caracterización de dosímetros termoluminiscentes en Hp(3) utilizando detectores de tipo MCP-N, proporcionados por el LAF-RAM. En dicho estudio se caracterizó un lote original de 40 dosímetros y utilizando 16 para la calibración del sistema a través de una fuente estándar ¹³⁷Cs. Para la calibración se siguió la norma ISO 12794 que indica para el ¹³⁷Cs el coeficiente de conversión h_{pk} : 1,226 mSv/Gy y el uso de maniquí slab (tronco); encontrando un factor del sistema de 417 μSv/vuelta (Hurtado & Pasos, 2014).

En un estudio posterior realizado por García en 2017 en Managua para evaluar dosimetría de cristalino en Hp(3) a una muestra de personal médico intervencionista, se caracterizó un lote de 142 dosímetros. En este estudio se utilizaron TLD 100 y las condiciones de irradiación según el estudio efectuado de Hurtado y Pasos en 2014. Se encontró un factor del sistema de 292,9 μSv/vuelta (García, 2017).

Si bien el sistema dosimétrico de $H_p(3)$ para LAF-RAM se ha venido estudiando realizando pruebas tipo y calibraciones a partir de normas no vigentes, dichas investigaciones no han tenido el alcance de obtener la incertidumbre del sistema siguiendo metodología de derivadas parciales; en este trabajo se realizó el cálculo de la incertidumbre tomando en cuenta las magnitudes de influencia que afectan en la medición de la dosis y las derivadas parciales, para esto, se tomó como base un estudio realizado en el año 2017 en el laboratorio de dosimetría externa del LAF-RAM.

En la investigación que fue llevada a cabo por Gutiérrez, Villalobos, Benavidez, Lic. Fernando López y Leonardo González en 2017 en Managua, se utilizó las derivadas parciales como herramienta para la determinación de la incertidumbre combinada para el sistema de dosimetría externa del LAF-RAM. Este estudio demostró que para un equipo lector determinado y una magnitud específica como $H_p(10)$, la incertidumbre a partir de la ecuación de trabajo dada por el fabricante, debe incorporar correcciones en función de otros factores como fading, dependencia energética y angular. Esta investigación tuvo como producto la elaboración de una plantilla en Excel la cual aborda el presupuesto de incertidumbre para lo cual se usó la Guía para la Expresión de la Incertidumbre. (Gutiérrez Ortiz, Villalobos Mendoza, Benavidez Valmaceaz, López González, & González Estrada, 2017)

2.2 Marco teórico

Se definirán a continuación las magnitudes utilizadas en protección radiológica y su clasificación: dosimétricas, operaciones, limitadoras. La tipificación ha sido realizada por un grupo de trabajo conjunto de la ICRP y la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (CIUMR por sus siglas en inglés). (The International Commission on Radiation Units and Measurements and The International Commission on Radiological Protection, 2017)

2.2.1 Magnitudes Dosimétricas

Las magnitudes dosimétricas se conciben como una medida física que se correlaciona con los efectos reales o potenciales de la radiación. La dosis absorbida, es la magnitud dosimétrica de más interés, resulta válida para cualquier tipo de radiación, y requiere especificar el material en el que se cede la energía. (CSN, 2009)

2.2.1.1 Dosis Absorbida

Con la dosis absorbida, de cualquier tipo de radiación ionizante, se pretende valorar la cantidad de radiación que es absorbida por la materia. La absorción de la radiación está representada por una cesión de energía al medio, que conlleva la desaparición o pérdida de parte de su intensidad. (CSN, 2009)

Esta magnitud queda definida como:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde $d\bar{\epsilon}$ es el valor medio de la energía cedida por la radiación y absorbida por una cantidad de masa dm . La unidad del Sistema Internacional es Gray(Gy)=Jkg⁻¹

La dosis absorbida se define para cada punto del material irradiado. Por tanto, cuando se habla de la dosis en un órgano o tejido, se supone que hace referencia al valor promedio del total absorbido, y en cada uno de los gramos que componen ese volumen irradiado. (CSN, 2009)

2.2.3 Magnitudes limitadoras

Las magnitudes limitadoras son las que se utilizan para establecer límites máximos con objeto de proteger a los seres humanos de los posibles efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. Estas magnitudes son valores medios, promediados sobre una masa extensa, como puede ser un órgano o un tejido humano. (CSN, 2009)

2.2.3.1 Dosis equivalente en un órgano H_T

La dosis equivalente a un órgano o tejido es la dosis al órgano corregida por un factor de ponderación del tipo de radiación que tiene en cuenta la eficacia biológica relativa de la radiación incidente para producir efectos estocásticos sobre la salud, esto depende no solo de la dosis absorbida sino también del tipo y energía de la radiación considerada. (CSN, 2009)

La dosis equivalente en un órgano o tejido T debida a la radiación R, $H_{T,R}$ se define como:

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media para la radiación R en el órgano o tejido T y w_R es el factor de ponderación para la radiación R.

Puesto que los factores de ponderación son números, la unidad para la dosis equivalente en un órgano o tejido es la misma que para la dosis absorbida, es decir: J/kg. Sin embargo, se utiliza el nombre especial de Sievert [Sv] para distinguir claramente cuando se está hablando de esta magnitud y cuando de dosis absorbida o de Kerma (magnitudes dosimétricas que no tienen en cuenta posibles efectos biológicos). (CSN, 2009)

2.2.3.2 Dosis efectiva E

La probabilidad de aparición de efectos estocásticos² depende no solo del tipo de radiación sino también del órgano considerado. Es decir, no todos los órganos y tejidos del cuerpo humano son igualmente radiosensibles. Por tanto, se consideró apropiado definir una

² *Efectos estocásticos*: Deben su nombre a la naturaleza aleatoria “*estocástica*” de la interacción de la radiación con la materia, se supone que estos efectos no tienen un umbral de dosis para su aparición. (International Atomic Energy Agency IAEA, 2013)

magnitud más, a partir de la dosis equivalente, que tuviese en cuenta la combinación de diferentes dosis en diferentes órganos como consecuencia de una irradiación del cuerpo entero. (CSN, 2009)

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde H_T es la dosis equivalente recibida por el tejido u órgano T y W_T el factor de ponderación de un tejido correspondiente al tejido u órgano T.

2.2.4 Magnitudes Operacionales

Las magnitudes limitadoras descritas anteriormente no pueden medirse puesto que para ello habría que situar los detectores en el interior de los órganos del cuerpo humano. Por esta razón, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiológicas (ICRU por sus siglas en inglés), ha definido un grupo de magnitudes capaces de proporcionar en la práctica una aproximación razonable (o una sobreestimación) de las magnitudes limitadoras. Estas magnitudes medibles se definen a partir de la dosis equivalente en un punto del cuerpo humano o de un maniquí y su relación con las magnitudes limitadoras puede calcularse para condiciones de irradiación determinadas. (The International Commission on radiation units and measurements (ICRU), 2017)

Las magnitudes operacionales recomendadas fueron introducidas por ICRU en 1985 para diferentes aplicaciones de dosimetría personal y ambiental. Para la vigilancia de área se han introducido dos magnitudes que enlazan la irradiación externa con la dosis efectiva y con la dosis en la piel y el cristalino. Dichas magnitudes son el equivalente de dosis ambiental, $H^*(d)$ y el equivalente de dosis direccional, $H'(d,\Omega)$. (The International Commission on radiation units and measurements (ICRU), 2017)

Este trabajo se centrará solamente en las magnitudes para la vigilancia individual en profundidad.

2.2.4.1 Equivalente de dosis personal en profundidad, $H_p(d)$

Las magnitudes de protección radiológicas no pueden ser medidas directamente, es por esto que la ICRU introduce las magnitudes operacionales para monitoreo de exposición

externa (IAEA, 2018) (The International Commission on radiation units and measurements (ICRU), 2017).

La magnitud operacional Dosis equivalente personal $H_p(d)$ es utilizada para el monitoreo individual a una profundidad apropiada “ d ” es decir por debajo de un punto específico del cuerpo y referente al monitoreo radiológico de interés. En el caso de la exposición del cristalino la ICRU recomienda una profundidad de 3 mm por tanto la magnitud es $H_p(3)$, para cuerpo entero a 10mm de profundidad la magnitud es $H_p(10)$ y para las extremidades $H_p(0,07)$ a 0,07mm de profundidad. (IAEA, 2018) (ICRU, 2011).

2.2.5 Dosímetros Termoluminiscentes

La termoluminiscencia (TL) es una técnica muy empleada en dosimetría, se basa en la propiedad que tienen la mayoría de los materiales de redes cristalinos de almacenar parte de la energía que absorben al ser expuestos a las radiaciones ionizantes. Posteriormente, al ser calentados emiten dicha energía en forma de luz y en un sistema ideal esta es directamente proporcional a la dosis absorbida por el material. (Samiñon, 2015).

Los materiales termoluminiscentes tienen propiedades aislantes, sin embargo, de un aislante cristalino perfecto, las bandas de conducción y valencia están separadas por una diferencia de energía de varios eV, y no hay niveles de energía intermedios dentro de este intervalo de banda. (AAPM, 2020).

Los TLD son detectores pasivos, es decir, permiten acumular la información sobre la cantidad de dosis recibida debida a las radiaciones ionizantes la cual se extrae en un proceso posterior de calentamiento, se fabrican agregando impurezas en su red cristalina, introduciendo así niveles de energía dentro del intervalo de banda cercano al elemento de la impureza. Cuando el TLD se expone a la radiación ionizante genera ionización y excitación en el detector produciendo movimiento de electrones hacia la banda de conducción y dejando huecos en la banda de valencia. Esto a su vez resulta en el movimiento electrón-hueco en sus respectivas bandas energéticas; interrumpidas por procesos de recombinación o captura por defectos conocidos como trampa de electrón o trampa de agujeros, como se muestra en la figura 2.1. (AAPM, 2020).

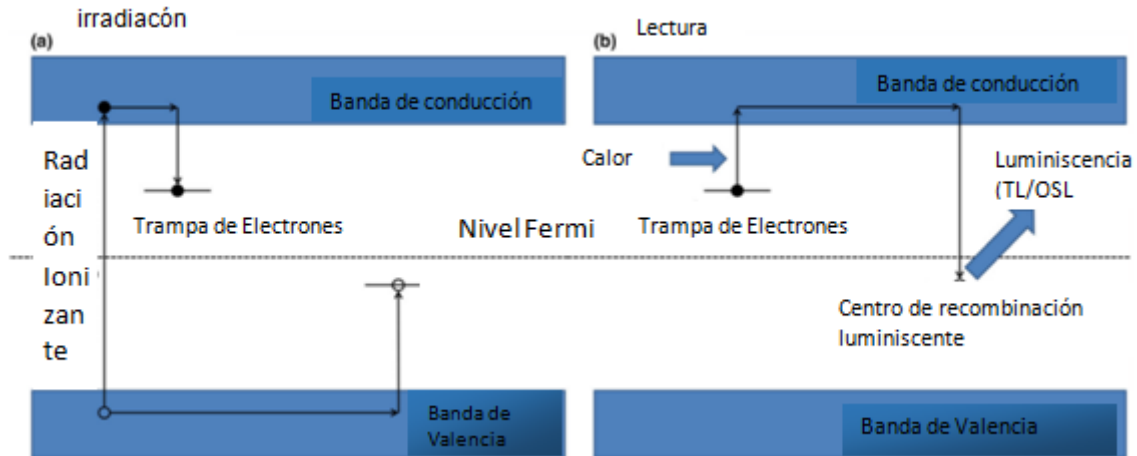


Figura 2.1. Modelo simplificado del principio de funcionamiento de termoluminiscencia. Tomada y editada de (AAPM, 2020)

Las trampas de las cargas electrón-huecos pueden permanecer en dicho estado (atrapado) largos periodos de tiempo con dependencia directa de la profundidad de la trampa o diferencia energética entre los centros de combinación y las bandas de valencia o de conducción (AAPM, 2020).

Para liberar las cargas electrón-huecos de sus trampas se requiere un estímulo energético adicional en forma de calor a través de un proceso de lectura. Cuando se libera el electrón, puede recombinarse con el agujero atrapado, creando un defecto en el estado excitado, es decir una relajación de estos defectos para volver al estado fundamental por emisión de luz (luminiscencia). (AAPM, 2020).

Los lectores termoluminiscentes es el equipamiento asociado que estimula al detector entregando calor y registran la luminiscencia a través de un tubo fotomultiplicador cuya función es convertir la luminiscencia en cuentas o corriente. La luz total emitida es una medida del número de los electrones atrapados y por lo tanto la radiación total absorbida. (AAPM, 2020)

2.2.6 Curvas de Brillo (Curva Glow) y material TL

Convencionalmente, la manera en que se relaciona el fenómeno de la termoluminiscencia con la exposición a la radiación es a través del gráfico de la curva de brillo o Glow Curve. Esta curva representa la intensidad de Luz en función de la temperatura.

La señal TL puede definirse como la intensidad máxima de un pico TL. Considerando que los diferentes centros de captura o trampas dentro del material obedecen a distintos niveles energéticos, así requieren diferentes temperaturas para su liberación y a medida que el detector se calienta, los centros de captura se estimulan secuencialmente generando distintos picos. (AAPM, 2020)

El pico máximo de temperatura y la señal TL máxima dependen de la velocidad de calentamiento. Para minimizar el efecto de las fluctuaciones debida a la velocidad de calentamiento, la integral de la señal TL se utiliza en lugar de su máximo para determinar la dosis (AAPM, 2020). Para garantizar resultados reproducibles, se debe utilizar un ciclo de calentamiento constante.

De acuerdo con la figura 2.2, los dosímetros MCP-N muestran tres picos (con una temperatura de lectura a 250°C). El pico que sobresale es llamado pico dosimétrico porque es la región que más interesa de la curva, puesto que es en ese intervalo donde se realiza la estimación dosimétrica.

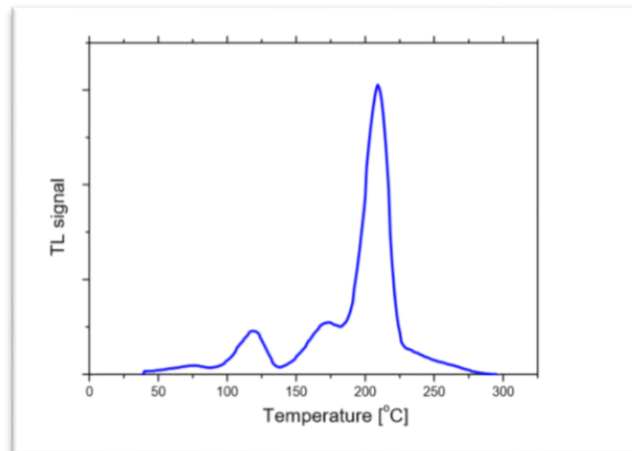


Figura 2.2 Curva de brillo y respuesta a la dosis MCP-N tomada de (GmbH, RadPro International, s.f.)

Los lectores de dosímetros termoluminiscentes suelen entregar la fuente de energía calorífica a través de una plancheta calentada óhmicamente (resistencia) o a través de un flujo de gas nitrógeno precalentado, este es el tipo de fenómeno que utiliza el sistema dosimétrico del LAF-RAM, como la configuración que se muestra en la figura 2.3.

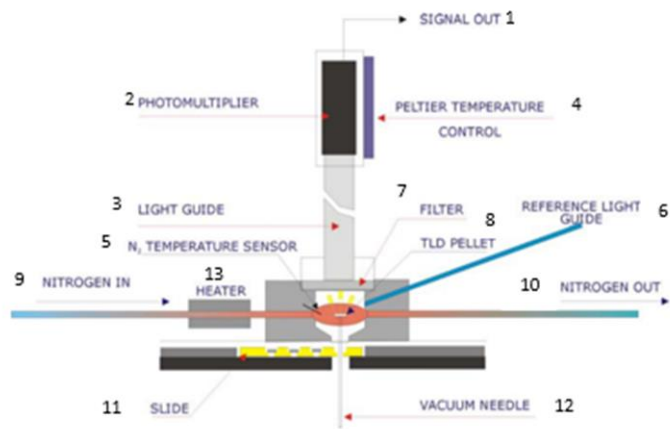


Figura 2.3 Principio de medición con sistema RADOS TLD. 1) señal de salida, 2) tubo fotomultiplicador, 3) Guía de luz, 4) Control de temperatura, 5) Sensor de temperatura de Nitrógeno, 6) Guía de luz de referencia, 7) Filtro, 8) cristal TLD, 9) Entrada de Nitrógeno, 10) salida de Nitrógeno, 11) Tarjeta, 12) Aguja de vacío, 13) Calentador. Tomada de (MIRION TECHNOLOGIES (RADOS), 2009)

El tipo de material MCP-N contienen elementos más sensibles ideales para la medición de la dosis del cristalino, tiene un número atómico efectivo 8,2; rango de linealidad hasta 10Gy, densidad $2,5 \text{ g/cm}^3$ (GmbH, RadPro International, s.f.). Posee 30 veces más sensibilidad a las dosis de rayos gamma que el tipo de material (MTS-N LiF:Mg,Ti) y es considerado inigualable para monitoreo ambiental y dosimetría personal.

2.2.7 Condiciones de calibración ISO 4037-3:2019 y pruebas de desempeño según la IEC 62387:2012

La ISO 4037 en su parte tres especifica las condiciones de irradiación de dosímetros personales y de área y la estimación de la respuesta en función de energía y ángulo de incidencia. En el apartado 7.2 incorpora las especificaciones de un nuevo maniquí simulador de cabeza. Este nuevo modelo se desarrolló con base en estudios del proyecto ORAMED acerca de las propiedades reales de la retrodispersión que se dan en la cabeza y en el comportamiento angular asociado a la forma y masa de esta, reconociendo que el maniquí bloque o Slab representa bien el tronco, pero no la cabeza donde se ubican los ojos. Este maniquí cilíndrico permite obtener una respuesta más cercana al comportamiento real de la incidencia de radiación en la cabeza. (Optimización de Protección Radiológica del personal médico (ORAMED), 2008-2011).

La evolución de la definición de la dosis equivalente personal a 3 mm de profundidad, $H_p(3)$, en los informes 43 y 47 de ICRU tuvo como factor de peso que no presentaban oficialmente un coeficiente de conversión, $H_p(3)$, (Bordy, 2015). Sin embargo, para el 2011 con el proyecto ORAMED propone una nueva definición sobre la base de un maniquí con geometría cilíndrica de material de tejido equivalente ICRU con diámetro y altura de 20 cm.

En una primera aproximación en términos de calibraciones, el maniquí fue introducido en la ISO 29661 sin embargo, en la ISO 4037:2019 en su parte 3 indica específicamente las dimensiones del maniquí, las condiciones de irradiación y el factor de conversión (ver tabla 22 en anexo).

De acuerdo con ISO 4037:2019 el maniquí consiste en un cilindro hueco lleno de agua con paredes de PMMA y un diámetro exterior de 200 mm y una longitud de 200 mm. Las paredes del cilindro y sus caras deben tener un espesor de 5 mm. La ISO 4037:2019 proporciona las condiciones de irradiación y recomienda coeficiente de conversión de 1,18 Sv/Gy (a 0°) para el tipo de fuente de referencia que se utilizó que es ^{137}Cs . Además, se requiere 3 mm de PMMA como capa de build up (utilizado para crear equilibrio electrónico) y una distancia de la fuente de 2,5 m.

En cuanto a los dosímetros estos son diseñados y fabricados según las características de la magnitud operacional a medir, en la norma actual de dosimetría IEC 62387 se establecen las características de desempeño de tales dosímetros y las pruebas a desarrollar según los criterios de aceptación.

La IEC 62387:2012 es la norma de Instrumentación de protección radiológica de sistemas de integración de dosimetría pasiva para el monitoreo personal y ambiental de fotones y radiación beta. En esta se proponen las pruebas para verificar el desempeño las cuales se encuentran descritas con los procedimientos y las consideraciones a tener en cuenta en un sistema dosimétrico. Seguidamente, se describen los requisitos y las pruebas a llevar a cabo en relación a la respuesta del dosímetro. En cada prueba está especificado los requisitos deben cumplirse para considerar como satisfactorio (ver tabla 21 en anexo). Además, se especifican las condiciones de cómo deben llevarse a cabo, al igual que cómo deben interpretarse los

resultados. En esta versión se añaden los requerimientos técnicos para dosímetros usados para medir la dosis equivalente personal Hp(3).

Las pruebas de la IEC 62387 que se proponen en este trabajo para verificar el desempeño de los dosímetros en magnitud Hp(3) son coeficiente de variación, no linealidad de la respuesta, Exposición a la luz, build up, fading, caída del dosímetro, dosímetros a 180° (tabla 18).

Es importante declarar las magnitudes de influencia que interviene en las pruebas a detallar y que estas influyen en los resultados, ya que existen dos tipos según la IEC 62387:2012, definidos a continuación.

Magnitud de influencia tipo F: magnitud de influencia cuyo efecto en el valor indicado es un cambio en la respuesta.

Magnitud de influencia tipo S: magnitud de influencia cuyo efecto sobre el valor indicado es una desviación independiente del valor indicado.

A continuación, se describen las pruebas con sus requisitos de cumplimiento, la metodología específica se describe más adelante en el capítulo siguiente.

2.2.7.1 Coeficiente de Variación

Se verifica el coeficiente de variación de un lote de dosímetros. Su cálculo es importante puesto que, a través de esta, se analiza la dispersión de la respuesta del conjunto dosimétrico. Para ello se considera las fluctuaciones estadísticas del valor indicado que deberán cumplir los siguientes requisitos:

$$\text{para } H < 0.1mSv \quad 15\% \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\text{rango } 0.1mSv \leq H < 1.1mSv \quad \left(16 - \frac{H}{0.1mSv}\right)\% \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{para } H \geq 1.1mSv \quad 5\% \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde H es el valor de dosis

Además, se especifica que para $w-2$ valores de dosis el valor del coeficiente de variación sea menor que C_l veces el valor de los límites citados anteriormente, y para los dos valores

de dosis restantes los valores del coeficiente de variación pueden ser menor que C_2 veces el límite citado anteriormente. Los valores de C_1 y C_2 se muestran en la Tabla 23 de anexo.

2.2.7.2 No linealidad

Se realiza en conjunto con el coeficiente de variación y esta prueba requiere que la variación de la respuesta debido a un cambio de la dosis equivalente no debe exceder los siguientes valores en todo el rango de medición de acuerdo al fabricante para la radiación de referencia de fotones. Esta prueba permite evaluar la proporcionalidad de la respuesta de un dosímetro con respecto a la dosis absorbida por el mismo, para evitar subestimar o sobreestimar. Se conoce la respuesta (r) como el cociente entre el valor esperado y el valor convencionalmente verdadero.

$$\text{rango } 0.1\text{mSv} \leq H < 1\text{Sv} \quad - 9\% \text{ a } + 11\% \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde H es el valor de dosis

2.2.7.3 Exposición a la luz (lector)

La IEC 62387 pide verificar la influencia de luz (debido al estímulo lumínico y calórico) influye en la respuesta o valor esperado de un lote de dosímetros. Esta prueba permite determinar si una cantidad de luz y calor específicas influye de alguna manera en la respuesta obtenida a partir de un valor esperado al momento de ser leído el dosímetro. La magnitud de influencia considerada se supone de tipo F. Por tanto, los requisitos planteados para la respuesta relativa y la desviación debida a un cambio de la luz es que esté dentro de sus rangos nominales no debe exceder los siguientes valores:

Para un espectro de luz visible (0 W/m^2 a $1\,000 \text{ W/m}^2$) las respuestas deberán estar entre $r_{min} = 0,91$; $r_{max} = 1,11$

Dónde: r_{min} : la respuesta mínima
 r_{max} : la respuesta máxima

2.2.7.4 Umbral de detección

La norma actual IEC 62387 no contempla esta prueba sin embargo se incluirá en esta investigación la metodología de la norma anterior de dosimetría IEC 61066 para establecer el límite de detección. De acuerdo con IEC 61066 el umbral de detección es el mínimo valor

de dosis detectable con fiabilidad estadística y se debe verificar la siguiente expresión: (IEC61066, 2006).

$$s \cdot t \leq H$$

Ecuación 8

Donde:

s: Es la desviación estándar de los valores medios,

t: Es el valor de la distribución t-student

H: Es el límite recomendado. Este es igual a: 1 mSv para dosímetros Hp(3).

2.2.7.5 Caída de dosímetro

La IEC 62387 indica que los dosímetros deben soportar caídas de 1 m de altura sobre superficies planas y superficies duras, rugosas como hormigón o acero sin que se exceda la desviación de $\pm 0,7 H_{Low}$ después de la caída en cada lado del dosímetro. La importancia de esta prueba yace en la necesidad de garantizar que, a pesar de que un dosímetro sufra una caída accidental como parte de su uso diario, la integridad física del pellet no se vea afectada de tal manera que presente una lectura de dosis alterada.

Con H_{low} : dosis baja del rango de medición.

2.2.7.6 Sobre respuesta a la incidencia de radiación

Si el dosímetro se irradia libremente en el aire desde el lateral ($\alpha_{m\acute{a}x.}$ a $180^\circ - \alpha_{m\acute{a}x.}$), el valor indicado no excederá de 1,5 veces (o 2 veces) el valor indicado resultante de una irradiación libre en aire con la misma calidad de radiación desde el frente (0°) para dosímetros. Esta prueba permite valorar la respuesta del dosímetro en diferentes posiciones por posibles diferencias de absorción del material respecto a la absorción por la posición horizontal.

2.2.7.7 Colocación incorrecta del dosímetro (Dosímetros a 180°)

Para dosímetros con porta dosímetro (o holder) no simétricos como los de cristalino, el dosímetro deberá además de la prueba de irradiación con incidencia normal, ser colocado en la parte frontal del maniquí con la espalda hacia la fuente de radiación. Esta prueba se realiza

para determinar la influencia del uso incorrecto de un dosímetro (portado al revés) al ser expuesto a radiación ionizante y posteriormente leído.

2.2.7.8 *Build up, (fading), auto irradiación y respuesta a la radiación natural (para dosímetros).*

El fading es el proceso por medio del cual la información latente (respuesta) de un detector se pierde de manera involuntaria primordialmente debido a factores térmicos. La pérdida de información se verifica a través de esta prueba la cual tiene como magnitud de influencia el tiempo, considerándose como influencia de tipo F y tipo S. La respuesta relativa y la desviación debida al build up y al fading no deben exceder para un tiempo máximo de medición $t_{max}= 2$ meses (este tiempo es el periodo establecido de monitoreo por el LAF-RAM).

Tipo F: $r_{min}=0,91$; $r_{max}=1,11$

Tipo S: $D_{mnx} = 0,7H_{LOW}$ a una dosis de $H= 7H_{LOW}$

Dónde: r_{min} : la respuesta mínima

r_{max} : la respuesta máxima

Con H_{low} : dosis baja del rango de medición.

El valor indicado debido a la auto-irradiación y la radiación natural no debe diferir en más del límite inferior del rango de medición del valor real convencional de la radiación natural, durante el tiempo máximo de medición normal.

2.2.8 Incertidumbre

Todo sistema dosimétrico debe asegurarse de utilizar los métodos y procedimientos apropiados para la estimación de las incertidumbres asociadas a sus mediciones y resultados, con el objetivo de presentar una cifra lo más apegada posible a la realidad sobre la duda que existe con respecto a los cálculos realizados.

La incertidumbre de la medida es el parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al

mensurando. Según el ítem 2.3 del Vocabulario Internacional de Metrología, Mensurando es la “magnitud que se pretende medir” (Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM), 2012)

2.2.8.1 Modelo matemático

Un modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre las variables involucradas en la medición, es por esto que se considera a la medición como un proceso en donde se identifican magnitudes de entrada, esto significa que las condiciones bajo las que la medición es realizada, pueden modificar lo que está siendo medido. (La Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM), 2012)

En el monitoreo individual del cristalino del ojo, la magnitud a medir es la dosis personal equivalente $H_p(3)$, para el sistema dosimétrico del Laboratorio de Dosimetría Externa el cálculo de la dosis se realiza a través de la ecuación de trabajo particular dada por el fabricante a través del Software Win TLD Pro (MIRION TECHNOLOGIES, 2008).

$$H_p(3) = \frac{(CB-CZ)K_z}{K_R K_i} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde CB son las cuentas brutas del detector, CZ son las cuentas de sensibilidad a dosis cero, K_z es el factor de calibración del sistema, K_R es la sensibilidad del factor del lector y K_i es el factor de sensibilidad individual de cada detector, declarado en el LDE-PT-03 Procedimiento Evaluación de la Incertidumbre (LAF-RAM, 2020).

2.2.8.2 Identificación de las fuentes de incertidumbre

Se parte de la ecuación de trabajo (ecuación 8) y se añaden las fuentes de incertidumbre que contribuyen en el método de ensayo, esto se puede expresar a través de la siguiente ecuación:

$$H_p(3) = \frac{(CB-CZ)K_z K_l K_f K_E}{K_R K_i} - B_g \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde se adicionan las siguientes fuentes de incertidumbre: K_l Factor de corrección debido a la linealidad, K_f factor de corrección debido al fading, K_E factor de corrección de la

respuesta energética y angular, B_g es la contribución de la radiación natural o radiación de fondo.

Las ecuación 8 fue tomada del LDE-PT-03 y la 9 se retomó de la investigación realizada por (Gutiérrez Ortiz, Villalobos Mendoza, Benavidez Valmaceaz, López González, & González Estrada, 2017). Sin embargo se siguió la investigación realizada por (Chadia Rizk, 2020) ya que se incorpora la magnitud de entrada del Fondo o Background B_g .

Las componentes de la incertidumbre de medida se agrupan en dos categorías, Tipo A y Tipo B, según se estimen por métodos estadísticos o por otros métodos, y que se combinen para obtener una varianza conforme a las reglas de la teoría matemática de probabilidades, tratando también las componentes tipo B en términos de varianza. La desviación típica que resulta es una expresión de la incertidumbre de medida (Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados(VIM), 2012)

2.2.8.3 Evaluación tipo A de la incertidumbre de medida:

Según el (Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados(VIM), 2012), la evaluación de una componente de la incertidumbre de medida mediante un análisis estadístico de los valores medidos obtenidos bajo condiciones de medida definidas. Para varios tipos de condiciones de medida, como condición de repetibilidad, condición de precisión intermedia y condición de reproducibilidad.

Las Fuentes de incertidumbre tipo A para este estudio se describen a continuación:

Cuentas brutas del detector: Está en función de la cantidad de fotones que es captado en el tubo fotomultiplicador.

Cuentas de dosis cero: La variabilidad de las lecturas en dosis cero del detector suele generar cantidades significativas en la desviación estándar de las lecturas por parte de TLD debido a la variación en la corriente del tubo fotomultiplicador de los lectores.

Cuentas de sensibilidad individual de los detectores: Está no es más que la incertidumbre debida a la repetibilidad de las mediciones, es decir la estabilidad de la respuesta debido a repeticiones del uso del dosímetro.

Sensibilidad del lector: Depende de la calidad entregada por el fabricante. Puede presentarse diferencia en la respuesta termoluminiscentes.

Background: La incertidumbre debida a la variación en la radiación de fondo local.

Factor de calibración del Sistema Dosimétrico: La incertidumbre asociada a los procedimientos de calibración del sistema con la incertidumbre del campo de radiación utilizado en un laboratorio de calibración dosimétrico.

2.2.8.4 Evaluación tipo B de la incertidumbre de medida:

La evaluación de una componente de la incertidumbre de medida tipo B se diferencia del tipo A puesto que la tipo B se obtiene basada en criterios tales como:

- Asociadas a valores publicados y reconocidos
 - Asociadas al valor de un material de referencia certificado
 - Obtenidas a partir de un certificado de calibración
 - Relativas a la deriva
 - Obtenidas a partir de la clase de exactitud de un instrumento de medida verificado
 - Obtenidas a partir de los límites procedentes de la experiencia personal o juicio de expertos.
- (Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados(VIM), 2012)

Las Fuentes de incertidumbre tipo B para este estudio se describen a continuación, siguiendo lo planteado en el LDE-PT-03 (LAF-RAM, 2020):

Dependencia direccional: El TOE en cierto sentido no es capaz de manipular las fuentes de radiación completamente, por tanto, no está necesariamente expuesto aun haz directo.

No linealidad de la Respuesta: Se debe tanto al tipo de TLD como a sus características electrónicas del sistema lector. Un dosímetro debe tener una respuesta lineal hasta cierto rango máximo de dosis.

Fading: La dependencia de la temperatura y humedad ambiental, se debe a la liberación de trampas superficiales en materiales termoluminiscentes a temperatura ambiente.

Para considerar la contribución de incertidumbre debida al B_g , se realizó el análisis por Métodos de mínimos cuadrados. Se tomó en cuenta como variable a la pendiente m y la ordenada al origen b (Rodríguez, 2001). Ya que para esta magnitud se realiza un gráfico de la dosis de un lote de dosímetros en función de los días transcurridos. Esta prueba se realizó con los dosímetros empacados en su cubierta correspondiente.

Dichas variables se pueden calcular utilizando las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad \text{Ecuación 12}$$

Se utilizó un equivalente de la desviación estándar, S_y y se calcula como:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2}{N - 2}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Incetidumbre de la pendiente de la regresión Lineal

$$S_m = S_y \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Incetidumbre en el término independiente de la regresión Lineal

$$S_b = S_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}} \quad \text{Ecuación 15}$$

El mensurando y la incertidumbre se calculan a partir de las magnitudes de entrada. Esto fue realizado por el cálculo de la mejor estimación y la incertidumbre estándar y los coeficientes de sensibilidad para cada cantidad de entrada y salida, la incertidumbre combinada y expandida para un factor de cobertura elegido (k_{cov}) para magnitudes de entrada de Tipo A, la incertidumbre estándar, se le asignó al valor numérico de la desviación estándar dividido entre la raíz del número de mediciones para una serie de valores. (Chadia Rizk, 2020)

Siguiendo la investigación de Chadia Rizk para cantidades de entrada de Tipo B, fue calculado como el rango medio dividido por cualquiera de los siguientes valores:

- $\sqrt{3}$ si es probable que todos los resultados en el rango sean igualmente probables, tener un uniforme denominada distribución rectangular.
- $\sqrt{6}$ si es razonable suponer una distribución triangular con el rango como base.
- 3 si es una distribución normal (gaussiana), se supone que la probabilidad de cobertura está en el rango de 99,73%. (Chadia Rizk, 2020)

Incertidumbre combinada.

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada, denotada como $u_c(y)$, la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando Y . LDE-PT-03 (LAF-RAM, 2020)

La contribución de cada fuente a la incertidumbre combinada, expresada como $u_i(y)$, depende de la incertidumbre estándar $u(x_i)$ de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Es posible encontrar que una pequeña variación de algunas de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando y viceversa. LDE-PT-03 (LAF-RAM, 2020)

Se determina $u_i(y)$ por el producto de $u(x_i)$ y su coeficiente de sensibilidad c_i (o factor de sensibilidad):

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$$

Ecuación 16

Incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida U indica un intervalo que representa una fracción p de los valores que pueden probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia. (Wolfgang, Schmid, & Lazos Martínez, 2000)

$$U = k \cdot u_c \quad \text{Ecuación 17}$$

Mientras tanto, el coeficiente de sensibilidad, se calculó como la derivada parcial de la magnitud de salida con respecto a cada magnitud de entrada. Cuanto más grande es, mayor es el impacto de la entrada correspondiente a la de salida. Fue calculado según la siguiente ecuación:

$$c_{xi} = \frac{\partial Hp(3)}{\partial x_i} \quad \text{Ecuación 18}$$

2.2.9 Marco legal

Actualmente el país cuenta con un proyecto de norma: NORMA TÉCNICA OBLIGATORIA NICARAGÜENSE. DOSIMETRÍA PERSONAL. PRESTADORES DE SERVICIOS EXTERNOS. DISPOSICIONES Y REQUISITOS TÉCNICOS, se permitirá estandarizar los criterios de servicio en términos de dosimetría personal en la cual incluye la dosimetría de cristalino en el apartado 6 y 6.1 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE DOSIMETRÍA PERSONAL EXTERNA y magnitudes respectivamente.

Según lo descrito anteriormente, los dosímetros empleados en la vigilancia individual deben someterse a una serie de pruebas que implican estudiar las respuestas individuales de cada cristal a determinadas dosis y compararla con las respuestas promedios de todos los demás cristales que son utilizados en cada prueba, esto es necesario para demostrar la fiabilidad de los datos que se obtienen en el área de trabajo por el personal expuesto a radiación ionizante.

Por otro lado, como estado miembro del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Nicaragua reconoce las recomendaciones de las distintas normas de seguridad del OIEA organismo quien a su vez adopta aquellas generadas del ICRP y la ICRU. En este sentido, la ICRP en su reporte 85 manifiesta una reducción del límite de dosis equivalente en cristalino del ojo a 20 mSv/año, promediado durante períodos definidos de 5 años, sin un solo año superior a 50 mSv. (ICRP118, 2011)

En lo que concierne a la vigilancia radiológica del TOE, de acuerdo con la Guía General de Seguridad GSG 7 (Occupational Radiation Protection), un programa de monitoreo establece que las dosis recibidas por los trabajadores por exposición externa deben evaluarse a través de resultados de un programa sistemático de monitoreo individual o a partir de los resultados del monitoreo en el lugar de trabajo. (IAEA, 2018).

Esta Guía establece que cuando se va a realizar un monitoreo individual de los trabajadores, cada trabajador debe contar con un dosímetro personal integrado y la dosimetría individual debe ser realizada por un servicio de dosimetría aprobado por el organismo regulador; por tanto, es de esperar que el organismo regulador requiera la existencia de dicho

servicio para suministrar dosímetros capaces de medir Hp (10), Hp (3) y/o Hp (0,07). (IAEA, 2018)

En la GSG 7 también se expresa que el monitoreo del cristalino debe considerarse en los lugares de trabajo donde los ojos están particularmente cerca del emisor de radiación (que también puede ser una fuente de radiación dispersa) o del haz de radiación. Ejemplo de este tipo de situación de exposición son trabajadores en el sector médico del área de intervencionismo o también personal de algún sector de medicina nuclear, personal involucrado en biopsia guiada por tomografía computarizada e ingenieros de ciclotrón. (IAEA, 2018). En el caso de Nicaragua las situaciones de exposición que aplican son las del sector de intervencionismo y medicina nuclear. Sin embargo, este estudio se ha centrado en resolver el problema de la vigilancia radiológica principalmente hacia el grupo de TOE de intervencionismo cuya población es mayoritaria aun cuando el resultado de esta investigación beneficiaría también a TOE de medicina nuclear si fuese solicitado el servicio.

2.3 Hipótesis

El uso de dosímetros termoluminiscentes MCP-N para la calibración y verificación del desempeño del sistema dosimétrico para medir dosis equivalente personal Hp(3) en el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología, permitirá brindar el servicio de monitoreo de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a nivel nacional y por lo tanto evaluar si las condiciones de trabajo y operación admiten dosis de radiación acorde a los límites recomendados.

CAPITULO III

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Tipo de Estudio

Se realizó un estudio cuantitativo debido a que se realizan mediciones para calibración del sistema, caracterización de lote de dosímetros y pruebas de desempeño de dosímetros, además se llevó a cabo un análisis estadístico en los resultados encontrados.

De acuerdo con el método de investigación el presente estudio es experimental puesto que se trabaja con el empleo de variables experimentales en condiciones controladas para comprobar la hipótesis planteada y según el nivel inicial de profundidad del conocimiento es descriptivo debido a que tiene el propósito de explicar las características más importantes que se presentan mediante la ejecución del estudio (Piura, 2012).

La clasificación de Hernández, Fernández y Baptista 2014, indica que el tipo de estudio es correlacional porque se busca establecer la relación o asociación entre las variables a estudiar. Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la información, el estudio es prospectivo puesto que la recolección de datos ocurre durante la realización de la investigación. (Roberto Hernández Sampieri, 2014)

Por el período y secuencia el estudio es de corte transversal porque se desarrolla en un periodo de tiempo determinado. (Elia Beatriz Pineda, 1994)

3.1.1.1 Universo

Se tomó como universo de la investigación los 357 dosímetros termoluminiscentes MCP-N disponibles en el laboratorio.

3.1.1.2 Muestra

Se define la muestra del estudio en dos tipos:

Muestra de investigación:

Es aquella en la cual se consideran los dosímetros de material MCP-N para Hp(3) disponibles en LAF-RAM.

Muestra experimental:

Está constituida por 150 dosímetros disponibles para llevar a cabo la calibración del sistema y cada una de las mediciones de cada una de las pruebas tipo correspondientes al estudio.

3.1.2 Operacionalización de variables

3.1.2.1 Identificación de las variables

La identificación de las variables se realizó mediante la ecuación de trabajo.

Variables independientes

- a) Factor de Calibración de Dosis Cero
- b) Factor de sensibilidad individual del cristal
- c) Factor de la calibración del sistema Dosimétrico
- d) Factor de la sensibilidad del lector
- e) Background

Variables dependientes:

- a) Coeficiente de Variación
- b) No linealidad de la respuesta
- c) Dosímetros a 180°
- d) Sobre respuesta a la incidencia de radiación
- e) Umbral de detección
- f) Exposición a la luz (Lector)
- g) Fading
- h) Prueba de Caída del dosímetro

Tabla 1: Operacionalización de variables

Objetivos	Variable	Tipo	Instrumento
Caracterizar un lote de dosímetros a través de asignación de sensibilidad de dosis cero e individual	Calibración de dosis cero del detector	Independiente	Lector RE2000
	Sensibilidad Individual del detector	Independiente	Lector RE2000 Irradiador RadPro IR-200 con fuente de ^{90}Sr

Objetivos	Variable	Tipo	Instrumento
Calibración del factor del sistema dosimétrico Hp(3)	Factor del sistema	Independiente	Maniquí cilíndrico según ISO4037-3 Fuente de referencia de ^{137}Cs

Objetivos	Variable	Tipo	Instrumento
Verificar el desempeño del sistema dosimétrico Hp(3)	Coefficiente de Variación	Dependiente	Fuente de referencia ^{137}Cs Maniquí cilíndrico según ISO4037-3 Lector RE2000
	No linealidad de la respuesta	Dependiente	
	Sobre respuesta a la incidencia de radiación	Dependiente	
	Dosímetros a 180°	Dependiente	
	Caída del dosímetro	Dependiente	
	Umbral de detección	Dependiente	
	Exposición a la luz (Lector)	Dependiente	
	Fading	Dependiente	

3.1.3 Equipos e instrumentos

Las listas de equipos e instrumentos presentados a continuación fueron utilizadas a lo largo de la investigación, estos han sido clasificados según las definiciones planteadas en el Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM).

En la Tabla 2, se muestran los equipos utilizados para procesar la información obtenida a través de la calibración del sistema dosimétrico y las pruebas tipo realizadas.

Tabla 2: Equipos para procesar información

Nombre del Software	Versión	Compañía
Office Excel 2013 (figura 3.1)	15.0.4433.1506	Microsoft Corporation Inc.
Office Word 2013	15.0.4623.1000	Microsoft Corporation Inc.
Bloc de notas (Dose txt)	6.1	Microsoft Corporation Inc.
Win TLDPro (Paquete de Software para controlar y gestionar el funcionamiento del lector RADOS TLD (figura 3.2 y 3.3)	1235-122	RADOS Technology Oy 11.2008

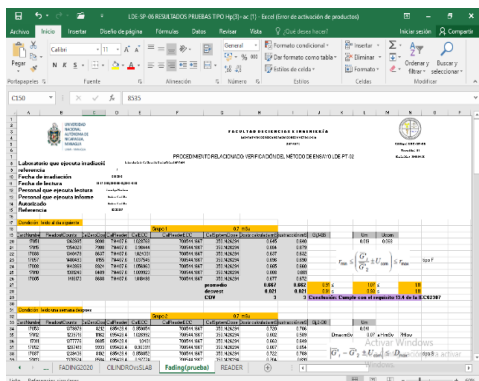


Figura 3.1 Office Excel 2013
Utilizado para la realización de cálculos para cada una de las pruebas tipo

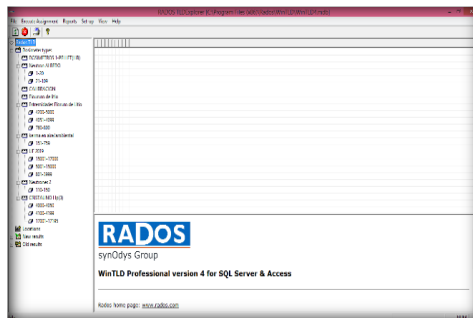


Figura 3.2 TLDEXplorer

Se ejecuta de una PC, establece la comunicación con el lector, guarda todos los resultados en la base de datos, mediante este se hace la configuración para el sistema dosimétrico

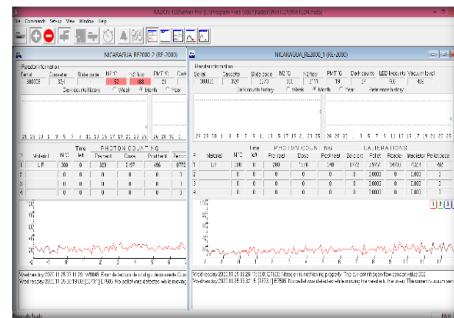


Figura 3.3 TLDSERVER

Gestiona la configuración del sistema, calibraciones y cálculo de las dosis, se muestra los datos de las lecturas que se realizan

El sistema de medidas con el que cuenta el LAF-RAM es el empleado a lo largo del estudio, en la Tabla 3 se muestra lo utilizado para proporcionar la información que se obtiene en cada medición.

Tabla 3: Sistema de medida

<i>Nombre del Instrumento</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>
RE 2000 Readers (figura 3.4)	RADOS TLD System	RE-2000
Generador de Nitrogeno (figura 3.5)	RADOS TLD System	Parker Domnik Hunter
IR 2000 Fast ⁹⁰Sr Irradiador compatible to RE-2000 readers (figura 3.6)	RADOS TLD System	IR 2000



Figura 3.4 RE 2000 Readers

Se utiliza para la lectura del detector TL, el lector puede procesar automáticamente 20 tarjetas de dosímetros u 80 elementos TL individuales.



Figura 3.5 Generador de Nitrógeno

Se utiliza para Suministro conveniente y económico de nitrógeno de alta pureza para TLD de gas caliente. Adecuado para TLD Reader modelo RE-2000



Figura 3.6 IR 2000 Fast 90Sr Irradiador

Se utiliza para la calibración de la sensibilidad del sistema para conocer la dosis local, para verificar la linealidad del sistema y para la calibración de la sensibilidad individual del detector TL

A continuación, en la Tabla 4 se describen brevemente los instrumentos utilizados para la calibración entre los cuales modelan los dosímetros MCP-N, los holder de cristalino con los que cuenta el Laboratorio de Dosimetría Externa, el maniquí cilíndrico que fue elaborado localmente para llevar a cabo la irradiación de los dosímetros, la fuente de referencia ^{137}Cs y banco de calibración.

Tabla 4: Instrumentos utilizados para la calibración

<i>Instrumentos</i>	<i>Características</i>	<i>Marca</i>
<p>Dosímetros MCP-N</p>  <p>figura 3.7 (RADOS RadPro International GmbH.)</p>	<p>30 veces más sensibilidad a las dosis de rayos gamma que los MTS-N, más utilizado en dosimetría ambiental y</p>	<p>RADCARD cristalino</p>
<p>Holder de Dosímetros Hp(3)</p>  <p>figura 3.8 (RADOS RadPro International GmbH.)</p>	<p>Facilidad de uso para monitorización de la dosis de Hp(3)</p>	<p>RADCARD</p>
<p>Maniquí cilíndrico de PMMA</p>  <p>figura 3.9 (fuente propia)</p>	<p>20 cm de alto x 20 cm de diámetro, paredes de 5 mm de PMMA, maniquí estándar para calibración de dosímetros Hp(3)</p>	<p>Elaborado localmente</p>

Fuente de referencia ¹³⁷Cs



figura 3.10 (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD)

Irradiador de ¹³⁷Cs con una actividad de 0.84 TBq Es utilizado para calibrar detectores utilizados en protección radiológica para distintos rangos de medición, así como la irradiación de dosímetros personales. (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD)

HOPEWELL
Designs, INC

Cámara de Ionización Patrón

cámara patrón de 1 L



figura 3.11 (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD)

cámara patrón de 10 L



figura 3.12 (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD)

Calibradas en un laboratorio secundario del OIEA. El volumen sensible es de uno y diez litros respectivamente, diseñadas para medir baja radiación en el rango utilizado en protección radiológica, es de forma esférica que permite una respuesta uniforme para cada dirección del haz de radiación. (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD)

PTW

Banco de calibración

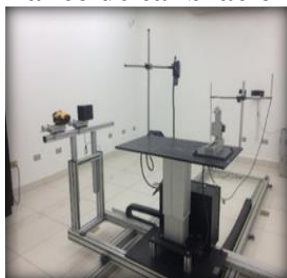


figura 3.13 (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD)

El banco de calibración consiste en un sistema de posicionamiento sobre dos rieles que se mueve en las direcciones x, y, z.

El banco de calibración se utiliza para las calibraciones del haz de radiación, detectores e irradiación de dosímetros. Utilizando el sistema de posicionamiento permite ubicar lo que se va a irradiar en el punto de interés. (Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD)

HOPEWELL
DESIGNS, INC

3.1.4 Localización geográfica

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología LAF-RAM ubicado en la Avenida Simón Bolívar, De la Rotonda Universitaria 150mts, al Sur, Villa Fontana, Managua (ver figura 3.14) de la facultad de Ciencias e Ingeniería de la UNAN-Managua, la irradiación de dosímetros para la calibración del sistema se llevará a cabo en el Laboratorio de Calibración Dosimétrica con una fuente estándar de ^{137}Cs utilizando un maniquí de PMMA cilíndrico simulador de cabeza. La lectura y caracterización del sistema se realizará en el Laboratorio de Dosimetría Externa.

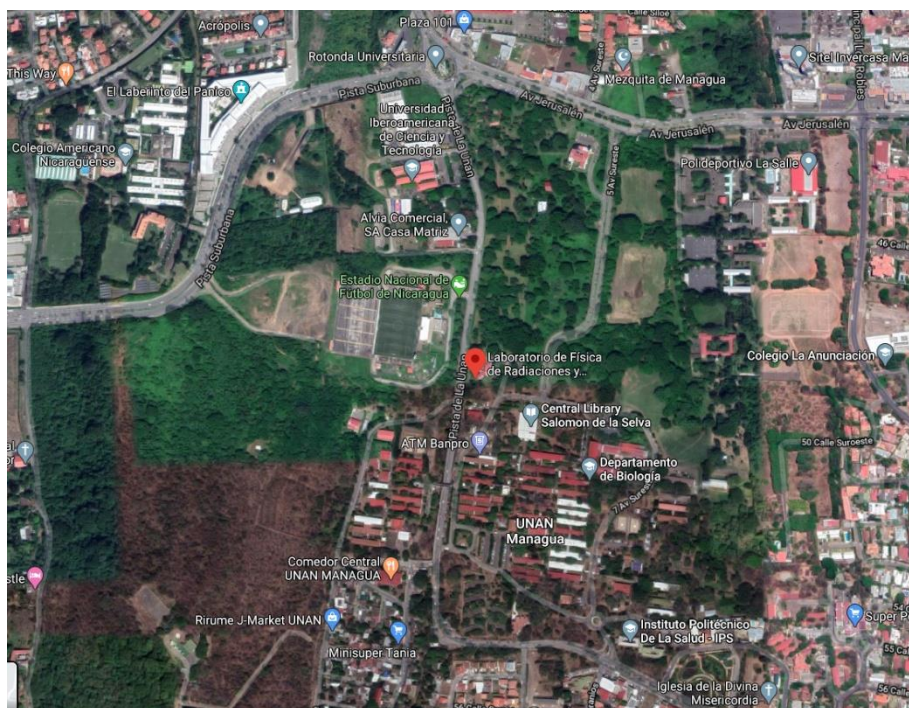


Figura 3.14 Vista satelital de la ubicación del LAF-RAM. Tomado de Google Maps. (Google Maps, 2005).

3.1.5 Procedimientos

En este apartado se detallan los procedimientos que se llevan a cabo para la caracterización del sistema dosimétrico en magnitud Hp(3), también se encuentran descrito las preparación generales y las consideraciones para la realización de cada una de las pruebas tipo.

Antes de iniciar la realización de las pruebas, se llevaron a cabo una serie de procedimientos para la calibración del sistema dosimétrico, para esto, se siguió los instructivos del laboratorio LDE-IT-03 y LDE-IT-07.

3.1.5.1 Calibración de dosis cero

Este factor corresponde al número de cuentas que se obtiene al leer un dosímetro que no ha sido expuesto a ninguna dosis de radiación, conocido como cuentas de fondo.

Se preparó un lote de dosímetros y se leyeron varias veces en el lector hasta observar como el número de cuentas cambia en cada lectura, en el software WinTLD Explorer de la computadora conectada al lector se buscan estas lecturas y se asignan a calibración de dosis cero, el software asocia cada dosímetro con un factor.

3.1.5.2 Calibración de la sensibilidad del lector

La sensibilidad del lector se calibró con un lote de 10 dosímetros con calibración de dosis cero, se irradiaron en el irradiador de mesa a 5 vueltas. Las lecturas obtenidas 12 horas pos irradiación se seleccionan y asignan a calibración de sensibilidad del lector. El software calcula el valor del factor de calibración, utilizando la ecuación (MIRION TECHNOLOGIES (RADOS), 2009):

$$F_R = \frac{\sum_i^n (C_{B_i} - C_{Z_i})}{n} \cdot \frac{1}{E} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde C_{B_i} son las cuentas brutas medidas del dosímetro, C_{Z_i} las cuentas de cero dosis, n es el número de dosímetros utilizados para hacer la calibración, y E es la exposición recibida por los dosímetros, en unidades locales (en este caso el número de vueltas en un irradiador de mesa local). La sensibilidad del lector debe calibrarse una vez por semana, en dependencia a la frecuencia que se realicen mediciones.

3.1.5.3 Calibración de sensibilidad individual

Se tomó el lote dosímetros previamente puestos en cero, utilizando el irradiador de mesa RadPro IR-200 (^{90}Sr) se irradian los dosímetros a 5 vueltas, 12 horas después de la irradiación se leen y los resultados se asignarán a calibración del cristal y se ejecutara la calibración de la sensibilidad individual del cristal, los datos obtenidos se encuentran entre 0,8 y 1,05.

3.1.5.4 Calibración del factor del sistema dosimétrico

Los dosímetros previamente caracterizados se dividieron en dos grupos de 10 dosímetros cada uno, un grupo se irradío a una dosis de 3mSv con una fuente de ^{137}Cs , utilizando el maniquí cilíndrico y siguiendo las recomendaciones para irradiación de dosímetros planteadas en la ISO4037-3 en la Figura 3.15 se observa el montaje realizado por el equipo del LCD para llevar a cabo la irradiación. Se dejó el otro grupo de dosímetros sin irradiar y se utilizaron para fondo. Después de 12 horas, se leyeron los dosímetros irradiados a 3mSv y se asignaron a calibración de *Dosímetros de dosis estándar*, las lecturas de los dosímetros de fondo se asignan en *Dosímetros de fondo de transporte*.



Figura 3.15: Montaje de irradiación de dosímetros con la fuente de referencia ^{137}Cs en el LCD del LAF-RAM.

Posteriormente, se tomó el lote de 10 dosímetros que anteriormente se habían irradío a 3mSv y se irradiaron a 5 vueltas en el irradiador de mesa para obtener el valor local. Debe realizarse la calibración del sistema con una frecuencia recomendada anual.

3.1.5.5 Linealidad con fuente de radiación beta (β) para comprobación del factor de calibración del sistema dosimétrico

Para hacer la verificación de la linealidad del sistema, se pusieron en cero un lote de 40 dosímetros y se prosiguió a irradarlos en grupos de 8 dosímetros en el irradiador local de mesa a distintas vueltas, en este caso se irradiaron a 1, 3, 5, 7 y 10 vueltas. Se leyeron los dosímetros y se realizó el cálculo para comprobar que se obtiene la dosis esperada, los valores obtenidos se grafican para observar la linealidad de la respuesta.

3.1.6 Pruebas tipo

La metodología empleada en cada una de las pruebas se describe al detalle a continuación:

3.1.6.1 Caída de dosímetro



Figura 3.16 prueba de caída de dosímetro

Para esta prueba se seleccionó un lote de 20 dosímetros, los dosímetros se dividen en dos grupos de 10 dosímetros cada uno, los grupos fueron expuestos con la fuente de ^{137}Cs a una dosis de 0,7 mSv. Un grupo de dosímetros se dejaron caer sobre una superficie lisa a 1 metro de altura como se muestra en la figura 3.16, el segundo grupo llamado grupo de referencia no serán dejados caer, se debe verificar que los dosímetros no hayan sufrido ningún daño después de la caída. Para los dos grupos se determinó el valor medio indicado G_i y la desviación estándar s_i . Luego de 12 horas fueron leídos y con los datos obtenidos se verificaron los criterios de aceptación establecidos en la IEC62387:2012.

3.1.6.2 Cálculo del umbral de detección

Se seleccionó un lote de 20 dosímetros sin irradiar y fueron leídos dos veces de forma consecutiva, con los datos de la segunda lectura se calculó la desviación estándar utilizando los valores de dosis, se multiplica el resultado por el valor de la t-student para un 95% de confiabilidad el número de grados de libertad (número de dosímetros menos 1) para obtener el resultado.

3.1.6.3 No Linealidad con fuente de radiación gamma (γ)

En esta prueba se tomaron 40 dosímetros previamente puestos en cero, se procedió a irradiar en grupos de 10 dosímetros en el LCD con una fuente de referencia ^{137}Cs a 0,1; 0,3; 1; 3; 10 y 30 mSv respectivamente, estos dosímetros fueron leídos 12 horas post irradiación, las lecturas obtenidas se recolectó de la base de datos para posteriormente ser procesadas y verificar el cumplimiento según la IEC 62387:2012.

3.1.6.4 Coeficiente de Variación

Esta prueba se realiza en conjunto con la prueba de linealidad, los resultados obtenidos deben de cumplir los requisitos establecidos por la IEC 62387:2012.

3.1.6.5 Sobre respuesta a la incidencia de radiación

Siguiendo lo recomendado en la IEC 62387:2012, se tomó un lote de dosímetros dividiéndolo en 8 grupos de cinco dosímetros cada uno, estos se irradiaron con distintos ángulos de incidencia α entre 0° a 120° en pasos de 10° (ver figura 3.18), libres en aire a 3mSv respectivamente. El grupo de dosímetros a 0° se tomó como grupo de referencia.

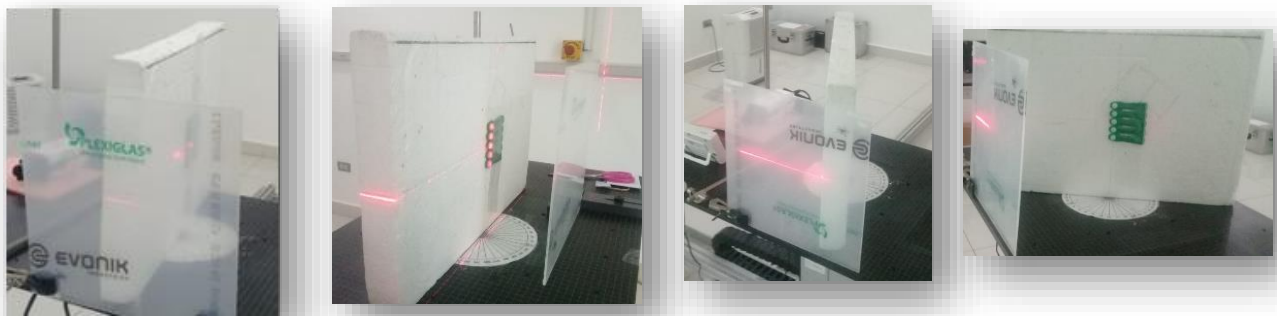


Figura 3.17 Montajes de prueba de dosímetros irradiados libres en aire a distintos ángulos

3.1.6.5 Exposición a la Luz (INFLUENCIA SOBRE EL LECTOR)

Se tomó dos grupos de 10 dosímetros, se irradiaron a 0,7 mSv con una fuente de referencia ^{137}Cs , uno de los grupos es leído exponiendo a la luz al lector se utilizó un bombillo de 100 W como se muestra en la figura 3.19. El otro grupo es tomado como grupo de referencia y no se debe exponer a ninguna luz adicional a la luz habitual.



Figura 3.19 prueba de exposición a la luz del lector

3.1.6.7 Colocación incorrecta del dosímetro (Dosímetros a 180°)

Se tomaron un grupo de 10 dosímetros irradiados a 180° respecto a su posición normal de incidencia a 1mSv (ver figura 3.20) y se toma como grupo de referencia el grupo de dosímetros de la prueba de la linealidad irradiados a 0° a 1mSv (figura 3.21).

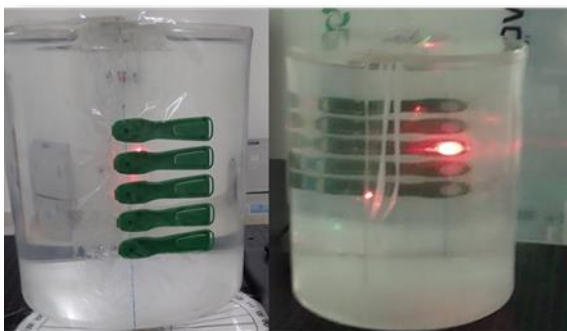


Figura 3.20 prueba de dosímetros irradiados a 180° (colocación incorrecta del dosímetro)



Figura 3.21 dosímetros de referencia irradiados a 0° (posición normal)

3.1.6.8 Fading

Se seleccionó un lote de 80 dosímetros y se dividen en 8 grupos los cuales tuvieron el siguiente tratamiento:

Los grupos 1 a 3 que constan de 7 dosímetros se expusieron (a radiación) a una fuente de referencia a 0,7mSv. El grupo 4 que consta de 25 dosímetros se expuso a 0,1mSv. Los grupos 5 a 7 que constan de 7 dosímetros y grupo 8 que consta de 25 dosímetros no se expusieron. Los grupos 1 y 5 se leyeron 1 día después de la irradiación.

Los grupos 2 y 6 (grupos de referencia) se leyeron una semana después de la irradiación.

Los grupos 3, 4, 7 y 8 se leyeron después del tiempo de medición máximo t_{max} de 2 meses.

La prueba de fading se evalúa considerándola como una magnitud con influencia tipo F es decir tiene un efecto en el valor indicado como un cambio en la respuesta del dosímetro y también se evalúa como una magnitud de influencia tipo S es decir su efecto en el valor indicado es una desviación independiente a este valor.

3.1.6.9 Prueba de Energía de radiación y ángulo de incidencia (radiación de fotones)

La variación de la respuesta relativa debido a un cambio del ángulo de incidencia para los dosímetros, dentro de los rangos nominales no debe exceder los siguientes: Para $H_p(3)$ 30keV a 250keV, de 0° a $\pm 60^\circ$ de la dirección de referencia $r_{min} = 0,71$ a $r_{max} = 1,67$. Para el Método de prueba se utilizarán las calidades de radiación especificadas en la serie ISO 4037 y S-Cs (^{137}Cs) al menos tres diferentes energías.

La prueba de la dependencia energética y angular no fue realizada puesto que el laboratorio solo cuenta con la fuente de referencia ^{137}Cs y no dispone de diferentes energías, sin embargo, se consideró el criterio de expertos como el obtenido por el estudio del proyecto ORAMED.

Los datos obtenidos para realizar la estimación de la incertidumbre debido energética dependencia energética y angular se estimó tomando la respuesta de los puntos de intercepción (ver figura 3.22) gráfica de la Respuesta Energética de EYE-DTM para radiación de fotones del catálogo de productos de (Radcard) para energías N-30, N-80 y N-120.

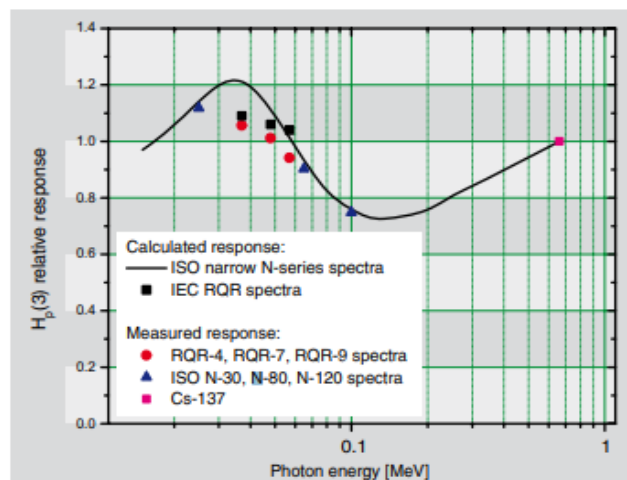


Figura 3.22 Respuesta energética de EYE-DTM para radiación de fotones tomada de (Radcard) www.radcard.pl

3.1.7 Estimación de la incertidumbre

La estimación de la incertidumbre del sistema dosimétrico del laboratorio de dosimetría externa se realiza mediante la tabla de presupuesto de incertidumbre, la cual fue confeccionada considerando la información proporcionada en las investigaciones de incertidumbre de (Gutiérrez Ortiz, Villalobos Mendoza, Benavidez Valmaceaz, López González, & González Estrada, 2017) y (Ambrosi, 2017).

La figura 3.23 muestra la tabla de presupuesto de incertidumbre, donde se clasifican las magnitudes de entrada que contribuyen en el cálculo de dosis Hp(3); a través de esta tabla se permite establecer la relación entre las componentes con el tipo de distribución, coeficientes de sensibilidad, incertidumbres estándar, grados de libertad asociados y el valor asociado en la contribución a la incertidumbre.

Magnitud	Mejor estimado	Valor absoluto de σ o s	tipo Distribución	Incertidumbre típica, u_i	Coefficiente de sensibilidad, c_i	Contribucion a la incertidumbre estandar, u_{ci}	contribucion a la incertidumbre	Grados de Libertad	Contribución a la	$U_i^{(95\%)}$
<i>CB</i>			Std. deviation							
<i>Cz</i>			Std. deviation							
<i>KZ</i>			Std. deviation							
<i>Ki</i>			Std. deviation							
<i>K R</i>			Std. deviation							
<i>K s</i>			Gaussian							
<i>K x</i>			Gaussian							
<i>K s</i>			Rectangular							
<i>BG</i>			Std. deviation							
<i>Hp(3)</i>										
								ν EFF	k	U_{ex}(95%)

Figura 3.23 presupuesto de incertidumbre

CAPITULO IV

4.1 Análisis y discusión de los resultados

En este capítulo se muestran los resultados de forma ordenada y relacionando los criterios de la IEC62387:2012 que permitirán la realización de los cálculos respectivos para poder aceptar o rechazar la hipótesis planteada a partir de los hallazgos encontrados.

4.1.2 Calibración del sistema dosimétrico

La calibración del sistema dosimétrico para Hp(3) dio como resultado un factor de 350,14 $\mu\text{Sv/vueltas}$ utilizando el maniquí recomendado por la ISO4037-3. Esta calibración permitirá ofrecer el monitoreo individual para las mediciones de dosis en el cristalino.

Comparación de dosímetros de cristalino irradiados en maniquí de tronco y maniquí cilíndrico

Para realizar esta comparación se utilizó un lote de 20 dosímetros los cuales se dividieron en dos grupos conformados por 10 dosímetros, un grupo se irradió en el maniquí de tronco y el otro grupo en el nuevo maniquí cilíndrico propuesto por la ISO 4037-3:2019 (ver figura 4.1 y 4.2), los dos grupos fueron irradiados a 1mSv en el LCD, encontrándose una diferencia relativa porcentual de 3,6% para las respuestas obtenidas con el maniquí cilíndrico y 6,1% para las respuestas obtenidas con el maniquí de tronco, esto nos indica la idoneidad de la utilización del maniquí cilíndrico para la irradiación de dosímetros de cristalino, puesto que permite obtener una respuesta más cercana al comportamiento real de la incidencia de radiación en la cabeza. Los hallazgos obtenidos se muestran en la tabla 5 donde se presentan los códigos de dosímetros para cada grupo.



Figura 4.1
dosímetros
irradiados en
maniquí cilíndrico



Figura 4.2
dosímetros
irradiados en
maniquí de tronco

Tabla 5: Comparación de dosímetros irradiados en maniquí cilíndrico e irradiados en maniquí de tronco

Grupo de dosímetros irradiados en maniquí cilíndrico		Grupo de dosímetros irradiados en maniquí de tronco	
Código	Dosis [mSv]	Código	Dosis [mSv]
17079	0,946	17129	1,043
17078	0,922	17128	1,076
17077	0,949	17126	1,026
17076	1,004	17127	1,062
17074	0,952	17125	1,038
17073	0,976	17124	1,075
17072	0,957	17165	1,087
17071	1,015	17166	1,065
17080	0,958	17167	1,057
		17164	1,084
Promedio	0,964	Promedio	1,061
Desviación	0,03	Desviación	0,02
Diferencia%: 3,6		Diferencia%: 6,1	

4.1.3 Verificación del valor del factor de irradiación con fuente de radiación beta (β) mediante la linealidad de la respuesta.

Se realizó una serie de irradiaciones a distintas vueltas (1, 3, 5, 7 y 10) en el irradiador local de mesa para verificar la linealidad de la dosis obtenida según el número de vueltas. En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos.

Para obtener la dosis calculada se utiliza la siguiente Ecuación presentada en el compendio del laboratorio (LDE-IT-02 INSTRUCTIVO LECTURA Y PUESTA EN CERO):

$$\text{Dosis Cristal} = \frac{(\text{Cuentas brutas} - \text{dosis cero del Cristal}) * \text{factor de irradiador}}{(\text{Sensibilidad lector} * \text{Sensibilidad Cristal})} \quad \text{Ecuación 20}$$

Tabla 6: Verificación del valor del factor de irradiación

Número de vueltas	Promedio de Dosis [mSv]	Dosis esperada [mSv]
10 vueltas	3,356	3,50
7 vueltas	2,350	2,45
5 vueltas	1,767	1,75
3 vueltas	0,994	1,05
1 vuelta	0,323	0,35

Se verifica la respuesta obtenida en la medición con la respuesta esperada. De igual manera, se realizan los cálculos para obtener la dosis esperada para cada número de vueltas. Para hacer la conversión a mSv del factor del sistema, se divide dicho valor entre 1000.

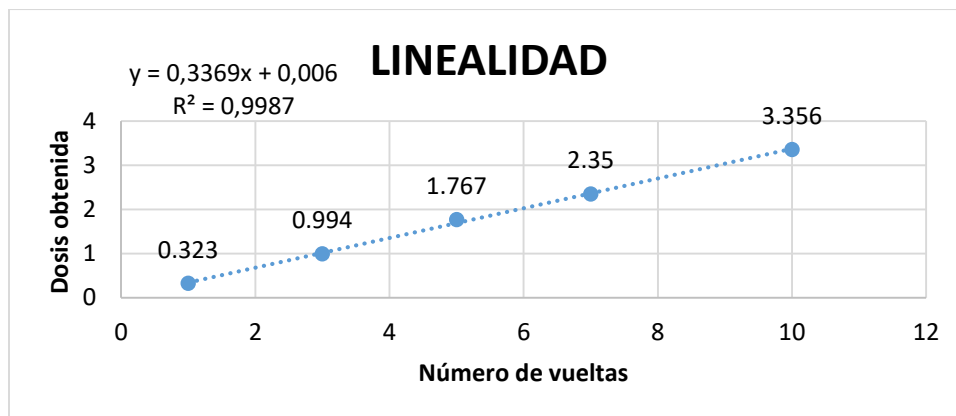
$$Dosis\ esperada = (\text{número de vueltas} \times \text{factor del sistema})/1000 \quad \text{Ecuación 21}$$

Se realizó la diferencia entre la dosis esperada y la obtenida a través de la siguiente ecuación:

$$diferencia\ relativa\ porcentual = \frac{|\text{valor esperado} - \text{valor obtenido}|}{|\text{valor esperado}|} \times 100 \quad \text{Ecuación 22}$$

Se observa una diferencia relativa porcentual de 7,78%; 5,37%; 0,96%; 4,07% y 4,14 % por vueltas entre la dosis obtenida y la esperada para 1, 3, 5, 7 y 10 vueltas respectivamente, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.3. donde se observa que a mayor número de vueltas mayor es la dosis obtenida por el detector, la linealidad nos permite verificar una respuesta proporcional de la dosis recibida con la respuesta obtenida, para poder sub o sobreestimar la dosis.

Figura 4.3: Linealidad de la Dosis obtenida vs el número de vueltas.



4.1.4 Resultados de calibración de dosímetros para campo

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la calibración dosimétrica (ver tabla 7) de asignación de dosis cero y sensibilidad individual del cristal siguiendo los procedimientos establecidos en el (Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (Laboratorio de Dosimetría Externa), 2019).

Tabla 7 Resultados de la caracterización de dosis cero y sensibilidad individual

Código	Dosis cero	Sensibilidad Individual	Código	Dosis cero	Sensibilidad Individual	Código	Dosis cero	Sensibilidad Individual
4106	9837	0,919	17012	11162	0,964	17066	8827	1,003
4113	8020	0,879	17014	8990	0,966	17067	8470	1,012
4116	7765	0,898	17015	7908	0,959	17068	9272	1,018
4117	9189	0,922	17016	10056	0,929	17070	8789	0,947
4130	76374	0,927	17017	7691	0,921	17101	5877	0,970
4133	8725	0,924	17018	9438	0,978	17102	6203	1,027
4135	131910	0,822	17020	9344	0,967	17103	7157	0,933
4143	8778	0,887	17023	7882	0,948	17104	7483	1,031
4145	8541	0,815	17033	7421	0,989	17105	7120	0,916
4151	6186	0,920	17034	9846	0,895	17106	6923	0,996
4156	96758	0,818	17036	7113	0,943	17107	7199	1,029
4159	7822	0,902	17037	8394	0,923	17108	9229	0,979
4160	10159	0,833	17042	7903	0,975	17109	6016	0,995
4162	9359	0,880	17043	8188	0,918	17110	8535	0,958
4169	6678	0,944	17044	9796	0,922	17111	7338	0,950
4173	5324	0,934	17046	8871	0,953	17113	7834	1,023
4178	10886	0,877	17047	8231	0,985	17114	9424	0,953
4179	6275	0,835	17049	8709	0,996	17115	8816	1,026
4190	79844	0,875	17050	8768	1,040	17117	7960	1,039
4192	6581	0,926	17051	9098	1,007	17118	5775	0,998
4195	11157	0,850	17052	9933	1,002	17120	8963	0,992
4196	8959	0,958	17053	8212	1,029	17138	8287	0,942
17001	8766	0,924	17056	8284	0,986	17169	6602	0,974
17002	9368	0,958	17060	10058	1,013	17065	8309	1,025
17003	9205	1,021	17061	8542	1,018	17011	8685	1,027
17004	8839	1,004	17062	9965	1,077	17038	7860	0,9226
17006	8287	0,906	17063	8213	0,992	17039	7452	0,9695
17007	7342	1,037	17064	8268	0,967	17041	4897	0,9375
17009	8680	0,9938	17070	8789	1,0034	17069	9635	0,9723
17031	9885	0,9455	17071	8315	0,9621	17084	8608	1,0394
17035	7549	0,9682	17077	6448	1,0146	17085	7626	1,0440
17055	9205	0,8775	17082	9203	1,0274	17086	5970	1,0507
17058	7991	0,9875	17083	8314	1,0308	17091	6598	1,0183

4.1.4 Pruebas Tipo

4.1.4.1 No Linealidad

Esta prueba nos permite asegurar en la reconstrucción de la dosis, que la misma corresponde con la absorbida por el personal, la linealidad en el espectro de energía considerado cumple con un papel relevante. En los requerimientos de los dosímetros de cristalino, la norma establece un rango de medida para Hp(3) de 0,1mSv a 1Sv; no se realizó irradiación hasta 1sv puesto que es un rango de medición plausible y económicamente no es adecuado someter a irradiaciones en el LCD de más de tres horas, el cual es el tiempo necesario para irradiaciones superiores a 30 mSv, sin embargo, el rango de dosis es suficiente para observar la tendencia en el comportamiento lineal de estos dosímetros. Según lo anterior, se ha llevado a cabo el ensayo para los valores de dosis indicados en la tabla 8 se presentan los datos de los dosímetros irradiados a distintas dosis, observando que para cada punto de dosis las respuestas se encuentran dentro del rango establecidos en la IEC 62387:2012, por lo tanto, los resultados son satisfactorios.

Tabla 8: Resultados de prueba de Linealidad

Dosis [mSv]	Promedio	Desviación	COV	Respuesta	U_m	U_{com}	Rango
0,1	0,098	0,009	9,3	0,983	0,007	0,003	1,07 0,92
0,3	0,31	0,01	2,5	1,02	0,005	0,005	1,07 0,98
1	0,972	0,038	3,9	0,946	0,03	0,017	1,031 0,932
10	9,90	0,42	4,2	0,99	0,32	0,173	1,052 0,948
30	29,27	1,32	4,5	0,98	0,993	0,523	1,037 0,933
Criterio IEC 62387 $0,91 - U_{C,com} \leq \left(\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{r,0}} \pm U_{com} \right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C_i} \leq 1,11 + U_{C,com}$							

Donde $U_{r,0}$ y G_r son los valores de referencia de los dosímetros irradiados a una dosis conocida; U_i y G_i son los valores de dosis calculada. Se realiza el cálculo de las incertidumbres asociada para cada grupo de dosímetros irradiados a distintas dosis con una

fuente de referencia, siguiendo las ecuaciones respectivas para U_m , U_{com} y $U_{C,com}$.

A continuación, en la figura 4.4 se muestra los valores de dosis reportados a través de las lecturas vs la dosis entregada por el LCD con la fuente de ^{137}Cs .

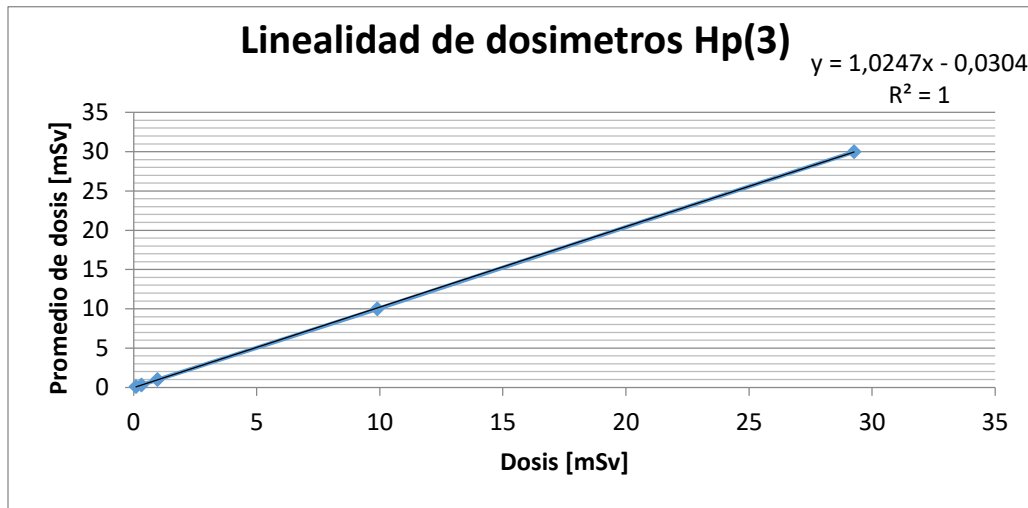


Figura 4.4 de No Linealidad

4.1.4.2 Coeficiente de Variación

Esta prueba nos informa acerca de la dispersión relativa de un lote de dosímetros. Los resultados de la determinación del coeficiente de variación COV se observan en la tabla 9, donde se presentan los datos de:

H [mSv]: Dosis a la que se irradiaron los dosímetros.

COV: Coeficiente de variación en un punto de dosis dado, el cual se obtiene como el cociente de la desviación estándar sobre la media aritmética $COV = (S/\bar{X})$.

n: número de lecturas o mediciones.

w: el número de puntos de datos (puntos de dosis).

C₁/C₂: valores límite utilizando C₁, que son valores más restrictivos que los valores de C₂, estos valores toman en cuenta el número de mediciones n y el número de puntos de datos (puntos de dosis) w. (Brunzendorf, 2007)

COV REQ: Coeficiente de variación requerido.

sigma max: Límite de aceptación.

Cociente: Se obtiene como el cociente entre el sigma máx requerido sobre el sigma máx medido.

Tabla 9: Resultados de la prueba de Coeficiente de Variación

H [mSv]	COV	n	C ₁ /C ₂	COV REQ	sigma max req.	sigma max medido	Cociente
0,02	4,5	10	1,073	0,05	0,001	0,001	1,0
0,1	9,3	10	1,073	0,15	0,015	0,01	0,6
0,3	2,5	10	1,073	0,13	0,039	0,01	0,2
1	3,9	10	1,073	0,06	0,06	0,04	0,6
10	4,2	10	1,073	0,05	0,5	0,42	0,8
30	4,5	10	1,073	0,05	1,5	1,32	0,9

Los valores de la Tabla 9 especifican valores de C₁ para w=7, que es el número de mediciones tomados para dosis diferentes, para lo cual se tomó el valor de C₁ para n=10 puesto que es el número de dosímetros utilizados en cada medición. Con lo que C₁ es igual a 1,073, en w=7, para n=10.

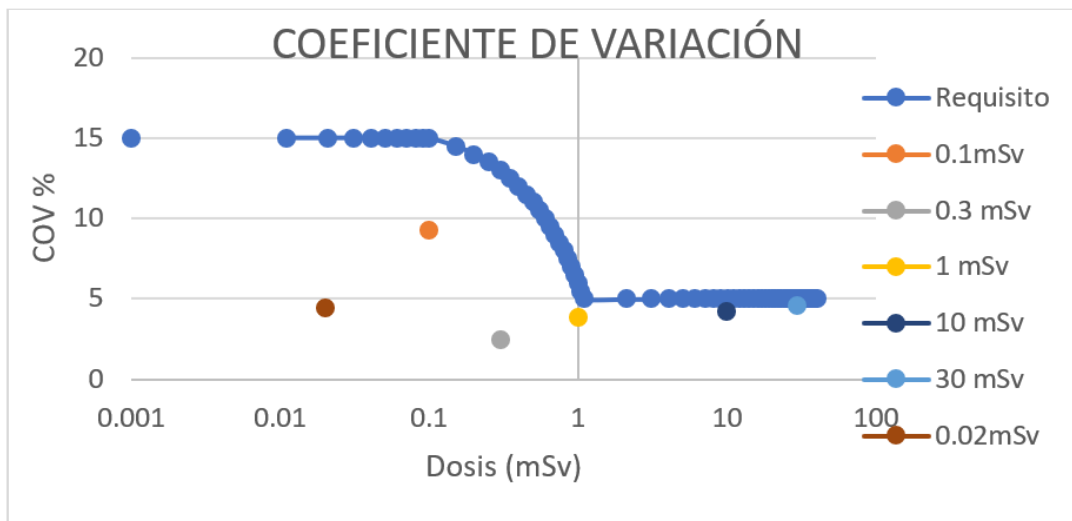


Figura 4.3 de los resultados del Coeficiente de Variación

Los resultados obtenidos satisfacen los requisitos planteados en la norma IEC 62387:2012. En la figura 4.3, se observa que los coeficientes de variación encontrados para cada punto de dosis se encuentran dentro de la curva de referencia para todos los valores de dosis a los que fueron irradiados los dosímetros. Cabe resaltar que los valores de COV más cercanos al límite de la norma fueron los de 10mSv y 30mSv con 4,2% y 4,5% en comparación al 5% permitido.

4.1.4.3 Umbral de detección

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para umbral de detección, donde se comprueba el cumplimiento de los requisitos establecidos en la IEC 61066:2006. Donde se demostró la estabilidad del dosímetro respecto a la radiación de fondo, se encontró el valor de 0,02 mSv como límite de detección del sistema dosimétrico.

Tabla 10: Resultados de determinación de la prueba de Umbral de detección

Código	Lectura [mSv]
17116	0,0975
17164	0,0629
17168	0,0790
17163	0,0798
17040	0,0996
17019	0,0793
17118	0,0766
17161	0,0821
17159	0,0799
17160	0,0747
17162	0,0847
17175	0,0787
17176	0,0726
17177	0,0783
17178	0,0740
17173	0,0776
17172	0,0745
17171	0,0840
17170	0,0793
17174	0,0796
Promedio	0,0798
Desviación S_Z	0,008
COV(%)	9,96
t_n	2,09
$U = t_n S_Z$	0,02

4.1.4.4 Prueba de Caída del dosímetro

El objetivo de esta prueba es cuantificar el efecto que pueda causar la caída de dosímetros a la dosis entregada. Los resultados que se presentan en la tabla 11 demuestran que no hay variaciones o diferencias significativas en la determinación de la dosis si el dosímetro sufre una caída a un metro de altura sobre una superficie dura como el piso o concreto.

Tabla 11: Resultados de prueba de caída.

Grupo de caída a 1m		Grupo de referencia	
Código	Dosis [mSv]	Código	Dosis [mSv]
17015	0,728	17088	0,694
17049	0,691	17057	0,647
17011	0,623	17008	0,637
17012	0,680	17010	0,659
17053	0,666	17005	0,641
17050	0,650	17055	0,722
17051	0,635	17056	0,660
17013	0,663	17060	0,680
17087	0,775	17009	0,594
17052	0,680	17007	0,645
Promedio	0,679	Promedio	0,658
Desviación	0,045	Desviación	0,035
U_m	1,01	U_m	0,079
		U_{com}	0,198
		Rango	0,219
			0,176
Criterio de la IEC 62387:2012 $ \overline{G}_2 - \overline{G}_1 \pm U_{com} \leq 0,7 \cdot H_{low}$			

Como se observa en la Tabla 11, que el ensayo es satisfactorio, debido a que la desigualdad se cumple, también se observó que tanto el porta dosímetros o holder como el detector TL no presentan ningún daño físico.

4.1.4.5 Exposición a la Luz (INFLUENCIA SOBRE EL LECTOR)

El objetivo de esta prueba es para comprobar el efecto que pueda causar una exposición de luz con respecto a la dosis entregada, puesto que durante el proceso de lectura la estimulación por el bombillo puede liberar las cargas atrapadas, esto podría dar lugar a fenómenos como la supralinealidad de la respuesta a la dosis. En la tabla 12 se muestran los resultados en desviaciones de la determinación de dosis en presencia de luz en el lector, en las columnas se encuentran los grupos de dosímetros utilizados en esta prueba, los que fueron leídos exponiendo a la luz al lector y el de referencia (que fueron leídos sin exponer a la luz al lector), se muestran el código, la dosis obtenida, el promedio y desviación estándar de las dosis.

Los resultados obtenidos con respecto del grupo de dosímetros expuestos a la luz y grupo de referencia cumplen con el criterio de la norma, por tanto, es satisfactorio.

Tabla 12: Resultados de los dosímetros expuestos a la luz.

Grupo de referencia		Grupo expuesto a la luz	
Código	Dosis [mSv]	Código	Dosis [mSv]
17088	0,735	17015	0,728
17057	0,715	17049	0,691
17008	0,688	17011	0,623
17010	0,705	17012	0,680
17005	0,663	17053	0,666
17055	0,758	17050	0,650
17056	0,693	17051	0,635
17060	0,678	17013	0,663
17009	0,608	17087	0,775
17007	0,668	17052	0,680
Promedio	0,691	Promedio	0,679
Desviación	0,042	Desviación	0,045
U_m	0,079	U_m	1,01
U_{com}	0,198		
Rango	0,219 0,176		
Criterio de la IEC 62387:2012 $ \bar{G}_2 - \bar{G}_1 \pm U_{com} \leq 0,7 \cdot H_{low}$			

Donde G_1 es el grupo de referencia que se leyó a condiciones estándar de lectura, es decir sin luz adicional, G_2 el grupo que se leyó mientras las partes sensibles a luz del lector son expuestas con el bombillo.

4.1.4.6 Sobre respuesta a la incidencia de radiación.

Los resultados de la tabla 13 muestran que las mediciones realizadas y analizadas en función de las desviaciones son satisfactorios ya que se encuentran para cada ángulo de irradiación por debajo del valor límite de 1,5. En la tabla se observan los ángulos a los que fueron irradiados, el promedio y desviación de las lecturas obtenidas para cada ángulo.

Tabla 13: Resultados de la prueba sobre respuesta a la incidencia de radiación desde 0° hasta 120° .

Ángulo	Promedio	Desviación	COV	U_m	U_{com}	Rango
0°	2,684	0,038	1,42	0,047	0,066	0,986 1,053
60°	2,615	0,10	3,83	0,176		
70°	2,834	0,342	12,06			
80°	2,694	0,163	6,07			
90°	2,692	0,087	3,21			
100°	2,578	0,036	1,41			
110°	2,635	0,130	4,94			
120°	2,484	0,092	3,72			
Criterio de la IEC 62387:2012 $\frac{\bar{G}_{\alpha_{max}} a^{180^\circ - \alpha_{max}}}{\bar{G}_{0^\circ}} + U_{com \leq 1,5}$						

Donde \bar{G}_α son los grupos de dosímetros irradiados a distintos ángulos, α_{max} se considera como 60° y \bar{G}_{0° es el grupo de dosímetros irradiados a 0° estos se toman como grupo de referencia.

4.1.4.7 Dosímetros a 180°

Esta prueba se realiza para analizar si hay diferencia en la respuesta del dosímetro si el usuario lo coloca de forma incorrecta a la que se debe ser utilizado. En la tabla 14 se observan los resultados obtenidos en esta prueba, en una de las columnas se muestra el grupo de dosímetros irradiados a 0° y en la otra columna el grupo de dosímetros irradiados en un ángulo de 180° .

Tabla 14: Resultado de la prueba de Grupo de dosímetros a 180°

	Grupo de referencia	Grupo a 180°
Promedio	0,972	1,08
Desviación	0,038	0,03
U_m	0,03	0,017
U_{com}	0,017	0,04
Rango	1,031 0,932	1,152 1,077
Criterio IEC 62387 $0,91 - U_{C,com} \leq \left(\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_{r,0}} \pm U_{com} \right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C_i} \leq 1,11 + U_{C,com}$		

Donde \bar{G}_i es el grupo de dosímetros irradiados con un ángulo de 180° y $\bar{G}_{r,0}$ el grupo de referencia, es decir, los dosímetros irradiados a 0°.

Los resultados de esta prueba son satisfactorios puesto que cumplen con los requisitos establecidos en la norma.

4.1.4.8 Build up, desvanecimiento (fading), auto irradiación y respuesta a la radiación natural (dosímetro).

Se comprobó que, para estos dosímetros, la pérdida de la señal termoluminiscente se considera aceptables al compararlos con los valores establecidos en la norma para tiempos posteriores a la irradiación de un día, una semana y dos meses. En el caso de los resultados encontrados para un periodo de dos meses los dosímetros irradiados a 0,7 mSv cumplen con el límite de la norma para la magnitud tipo F, sin embargo, en el caso del lote de dosímetros irradiados a 0,1 mSv no cumple con los límites establecidos en la norma para la magnitud de influencia tipo S.

Los resultados de análisis de mediciones en los grupos 1 a 3 irradiados a 0,7 mSv (leídos un día, una semana posterior a la irradiación y leídos dos meses posterior) se muestran en la tabla 15 y 16.

De cada valor indicado de los grupos 1 a 4, el valor medio indicado de los grupos 5 a 8 será restado, respectivamente: $\{G_{j,1} - G_5\}$, $\{G_{j,2} - G_6\}$, $\{G_{j,3} - G_7\}$ y $\{G_{j,4} - G_8\}$. A partir de estos nuevos grupos primos, se determinaron los valores medios G'_i

La tabla 17 muestra resultados considerando el build-up y fading como magnitudes de influencia tipo S dichos resultados son satisfactorios dentro del rango de aceptación para los grupos 1 a 3. En el caso de la tabla 18 se observan resultados no satisfactorios dentro del rango con D_{max} como 0,07.

Tabla 15: Resultados de Grupo 1 – 3 magnitudes de influencia tipo F.

Grupos	promedio	desviación	U_m	U_{com}	Rango
G'_1	0,662	0,021	0,019	0,068	1,07 0,93
G'_3	0,661	0,028	0,026	0,073	1,07 0,93
Criterio IEC 62387:2012 $0,91 \leq \left(\frac{\overline{G'_1}}{\overline{G'_2}} \pm U_{com}\right) \leq 1,11$					

Tabla 16: Resultados de Grupo 4' de influencia tipo F

Grupos	promedio	desviación	U_m	U_{com}	Rango
G'_4	0,077	0,012	0,005	0,010	0,83 0,81
Criterio IEC 62387:2012 $0,91 \leq \left(\frac{7 \cdot \overline{G'_1}}{\overline{G'_2}} \pm U_{com}\right) \leq 1,11$					

Tabla 17: Resultados de Grupo 1 – 3 magnitudes de influencia tipo S.

Grupos	promedio	desviación	U_m	U_{com}	Rango
G'_1	0,662	0,021	0,019	0,068	1,07 0,93
G'_3	0,661	0,028	0,026	0,073	1,07 0,93
Criterio IEC 62387 $ \overline{G'_1} - \overline{G'_2} \pm U_{com} \leq D_{max}$					

Tabla 18: Resultados de Grupo 4' de influencia tipo S

Grupos	promedio	desviación	U_m	U_{com}	Rango
G'_4	0,077	0,012	0,005	0,010	0,13 0,11
G'_2	0,661	0,044	0,041		
Criterio IEC 62387 $ 7 \cdot \overline{G'_4} - \overline{G'_2} \pm U_{com} \leq D_{max}$					

4.1.5 Estimación de la Incertidumbre para el rango de medición.

Se realizó el presupuesto o balance de las incertidumbres en la cual se enumera cada magnitud de entrada y se determinó el mejor estimado, tipo de incertidumbre A o tipo B, tipo de distribución de probabilidad, la incertidumbre típica.

El cálculo se realizó en los seis puntos de dosis que se encuentran dentro del rango de medición 100 μSv , 300 μSv , 1000 μSv , 3000 μSv , 10000 μSv y 30000 μSv . En la tabla 19 se muestran los resultados obtenidos de la estimación de la incertidumbre en las columnas se encuentran los distintos puntos de dosis, la contribución a la incertidumbre relativa mostrada en porcentaje y la incertidumbre expandida.

Tabla 19: Resultados de la estimación de la incertidumbre para todo el rango de medición.

Dosis[μSv]	Incertidumbre Expandida [μSv]	Contribución a la incertidumbre relativa (%)
100	19,33	8
300	17,90	7,15
1000	17,11	7,30
3000	17,55	7
10000	17,92	7,14
30000	17,28	7

El presupuesto o balance de incertidumbres se presenta en la tabla 24 del anexo, donde se muestra un ejemplo con los datos del cálculo de incertidumbre para el punto de dosis de 300 μSv . La tabla es válida para el resto de mediciones.

Se encontró la incertidumbre expandida para todo el rango de medición con un valor máximo de 20% para dosis baja. Este valor está dentro de lo considerado por el factor 1,5 propuesto por la ICRP para valores de dosis cercano al límite de dosis. (IAEA, 2018)

El background se realizó con un lote de 70 dosímetros, las lecturas corresponden a dosímetros que no fueron irradiados y puestos en cero previamente, esta información sugiere un indicativo de la radiación de fondo detectada en diferentes tiempos o días, el mayor tiempo de medición es de 83 días, este periodo abarca el tiempo máximo de medición de 2 meses lo cual permite una mejor estimación de la influencia del fondo sobre estos dosímetros. El cálculo fue realizado con el método de los mínimos cuadrados. Siguiendo también la

investigación de (Chadia Rizk, 2020), el cual declara que al cálculo de la dosis de fondo se debe corregir por esos factores.

En la tabla 20 se presenta el cálculo del Background por el método de mínimos cuadrados, se puede observar el tiempo en días en los que fueron efectuadas las lecturas, la dosis en mSv obtenidas en cada lectura, el t^2 tiempo elevado al cuadrado, la dosis corregida por KF es el factor de contribución del fading, KE es el factor de contribución de la dependencia energética y angular y KL es el factor de contribución de la linealidad, a través de estos datos se realiza el cálculo de la pendiente y la incertidumbre asociada a la m, el intercepto b.

Tabla 20 Cálculo del Background

				KF	1.0609			
				KE	1.1166	m	0.0017	
				KL	1.0150	b	0.0098	
	tiempo (d)	DOSIS (mSv)	t2	DOSIS CORREGIDA	(y-mx-b)²	Sm	Sb	r
	1	0.010	1	0.01202	2.73798E-07	0.00006	0.002316	0.7035
	5	0.020	25	0.02405	3.30224E-05			
	7	0.014	49	0.01656	2.63973E-05			
	16	0.025	256	0.03052	4.19829E-05			
	29	0.055	841	0.06613	4.93916E-05			
	60	0.098	3600	0.11783	3.63358E-05			
	83	0.125	6889	0.15029	3.71233E-07			
suma	0.3472		11661		0.000188			
promedio	29		1666					
Sm	5.67501E-05							
Sb	0.002316249							
Sy	0.006128							
incertidumbre combinada u	0.002							

A continuación, se presenta la gráfica de la Dosis [mSv] vs el Tiempo en [días], en esta se observa el comportamiento creciente de la dosis de fondo debido a la radiación natural en función del tiempo de almacenamiento de los dosímetros puestos a prueba.

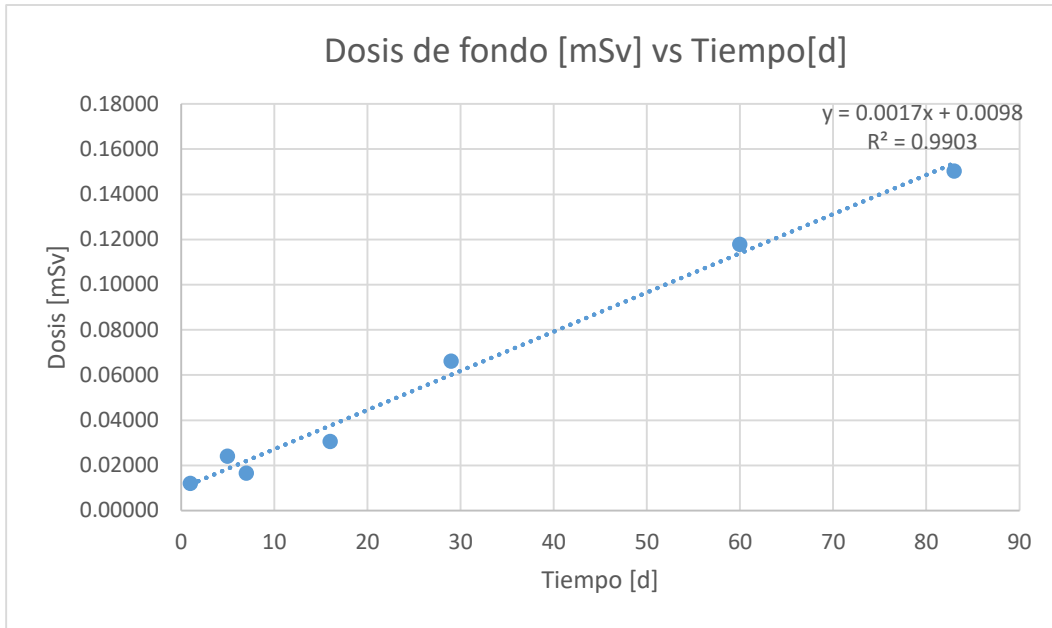


Figura 4.4: Resultados del cálculo del background

La mayor dosis es obtenida para los dosímetros leídos en 83 días y la menor contribución de fondos se encuentra en los dosímetros que se leyeron después de 1 día de su almacenamiento.

CAPITULO V

5.1 Conclusión

Según lo expuesto a lo largo de este trabajo y mediante los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

Los dosímetros MCP-N utilizados en este estudio fueron exitosamente caracterizados habiéndoles asignado las sensibilidades de Dosis Cero y de Cristal con valores aceptables según lo establecido en los procedimientos del LAF-RAM.

Además, se realizó la calibración dosimétrica del sistema de lectura RADOS-2000 del LAF-RAM utilizando una fuente de referencia de ^{137}Cs y el maniquí cilíndrico el cual fue elaborado localmente siguiendo las especificaciones propuestas por la ISO 4037 parte 3, dando como resultado un valor de 350,14 $\mu\text{Sv/vueltas}$, la calibración fue satisfactoria y se hicieron además comparaciones con el maniquí cilíndrico y maniquí de tronco las que satisfacen su utilización para homogeneizarse con la región.

Se realizaron las pruebas tipo del sistema con resultados satisfactorios exceptuando una de las condiciones temporales del fading de los dosímetros irradiados a 0,1 mSv y almacenados por un periodo de dos meses, las pruebas se efectuaron utilizando las normas de dosimetría IEC62387:2012 y siguiendo las condiciones de irradiación actuales de la ISO4037-3:2019, como resultado el sistema se encuentra caracterizado. Se realizó a demás la estimación de la incertidumbre para todo el rango de medición con una incertidumbre expandida menor al 20% para un nivel de confianza de 95%.

A partir de los hallazgos encontrados, se acepta la hipótesis puesto que los resultados satisfacen los requisitos específicos en la normativa actual, lo cual permite al LAF-RAM dar respuesta a la demanda existente y a la normativa nacional como prestador de servicio.

Por tanto, el sistema dosimétrico para la magnitud Hp(3) del LAF-RAM se encuentra caracterizado con fiabilidad metrológica al cumplir con los prerequisites y se encuentra apto para la apertura del servicio de dosis equivalente en cristalino, utilizando detectores MCP-N, con disponibilidad de 357 dosímetros para campo.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda repetir nuevamente la prueba del fading siguiendo los procedimientos planteados en la IEC62387:2012 o empleando una metodología diferente siguiendo publicaciones relacionadas o criterios de expertos.

Por la escasa cantidad de cristales MCP-N y la proyección de un posible incremento en la demanda de este servicio, se recomienda adquirir un nuevo lote o ampliar el servicio con otro tipo de material como respaldo con mayor cantidad existente.

5.3 Bibliografía

- LAF-RAM. (julio de 2020). LDE-PT-03 Procedimiento Evaluación de la Incertidumbre . Managua, Nicaragua.
- AAPM. (2020). *AAPM TG 191: Clinical use of luminescent dosimeters: TLDs and OSLDs*.
- Alejo, L., Koren, C., & Serrada, A. (13 de Abril de 2014). *ESTIMACIÓN DE LA DOSIS RECIBIDA EN CRISTALINO*. Obtenido de http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/110/45110577.pdf
- Altaf, T. H. (19 de 02 de 2017). Calibration of TLD in Eye Lens Dosimeter Hp(3) using wide Energy X-ray. Egipto.
- Ambrosi, P. (3-7 de abril de 2017). Capacitación en Incertidumbres en Protección Radiológica . . Viena, Austria .
- Andres, P. (Diciembre de 2009). Desconvolucion computarizada de la curva glow de dosímetros termoluminiscentes. San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Bordy, J. (2015). Monitoring of eye lens doses in radiation protection. *SFRP*, 9.
- Brunzendorf, J. (2007). How to type test the coefficient of variation of an indication. *Radiation Protection Dosimetry*, 12.
- Castillo, A. (28 de Abril de 2015). *Dosimetry with thermoluminescent detectors (Diapositivas)*. Trieste.
- Castro, M. (2015). ESTUDIO PILOTO DE DOSIS EN CRISTALINO EN RADIOLOGÍA INTERVENCIONISTA. *X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica*, 10.
- CEI/IEC. (1991). Sistema de dosimetría termoluminiscente para monitoreo personal y ambiental. Geneva, Suiza.
- Chadia Rizk, P. A. (2020). UNCERTAINTY EVALUATION IN MEASUREMENT OF THE PERSONAL DOSE EQUIVALENT AT NINE INDIVIDUAL MONITORING SERVICES IN ASIA AND THE PACIFIC REGION. 9.
- CSN. (2009). *MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS*. IRD_OP_GR_T05 .
- Elia Beatriz Pineda, E. L. (1994). *Metodología de la investigación Manual para el desarrollo del personal de salud*. Washington, D.C.
- García, J. (2017). Dosimetría en Cristalino al personal médico Intervencionista utilizando dosímetros termoluminiscentes TLD 100, en los hospitales Metropolitano de la ciudad de Managua y Asistencia Médica de Occidente S.A (León y Chinandega), durante el periodo de Enero a. Managua.
- GmbH, RadPro International. (s.f.). *Thermoluminescent Detectors*. Obtenido de www.radpro-int.com

Google Maps. (8 de Febrero de 2005). *Google Maps*. Obtenido de [https://www.google.com/maps/place/Laboratorio+de+F%C3%ADsica+de+Radiaciones+y+Metrolog%C3%ADa+\(LAF+-+RAM\)/@12.1084329,-86.2719845,1649m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8f7155914ae042a1:0xb5074d10dfd888ed!8m2!3d12.1083032!4d-86.2717783](https://www.google.com/maps/place/Laboratorio+de+F%C3%ADsica+de+Radiaciones+y+Metrolog%C3%ADa+(LAF+-+RAM)/@12.1084329,-86.2719845,1649m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8f7155914ae042a1:0xb5074d10dfd888ed!8m2!3d12.1083032!4d-86.2717783)

Gutiérrez Ortiz, J., Villalobos Mendoza, K., Benavidez Valmaceaz, M., López González, F., & González Estrada, L. (2017). *Utilización de las derivadas parciales como herramienta para la determinación de la incertidumbre combinada para un sistema de dosimetría externa del LAF-RAM, en el periodo Junio-Octubre 2017*. Managua.

Hurtado, E., & Pasos, J. (2014). Caracterización de un lote de dosímetros en magnitud Hp(3) utilizando el factor de conversión de la ISO 12794 para la energía de 137Cs.

IAEA. (2018). *Occupational Radiation Protection (General Safety Guide No. GSG-7)*. Vienna.

ICRP. (2013). *Dosimetric models of the eye and lens of the eye and their use in assessing dose coefficients for ocular exposures*.

ICRP(publicación60). (1990). *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Senda Editorial S.A.

ICRP118. (2011). *Dose limits to the lens of the eye: International Basic Safety Standards and related guidance*.

ICRU, V. 1. (2011). *Fundamental Quantities and units for Ionizing Radiation (Revised)*.

IEC61066, I. E. (2006). *Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring*.

International Electrotechnical Commission IEC62387. (2012). *Radiation protection instrumentation – Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation*.

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2013). *IAEA Protección Radiológica de los Pacientes*. Obtenido de <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/News/relid-cataract-study.htm#:~:text=De%20acuerdo%20con%20esta%20declaraci%C3%B3n,actualmente%20de%200%20%2C5%20Gy>.

International Atomic Energy Agency IAEA. (2013). *IAEA Protección Radiológica de los pacientes*. Obtenido de <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/Patients/information-public/index.htm#:~:text=Se%20denomina%20'radiaci%C3%B3n%20ionizante'%20a,suficiente%20para%20romper%20enlaces%20moleculares.&text=Se%20puede%20obtener%20m%C3%A1s%20informaci%C>

International Standardization Organization ISO 4037-3. (2019). *Radiological Protection-X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy-Part3: Calibration of area and personal dosimeter*.

- ISO. (Febrero de 2000). individual thermoluminescence dosimeters for extremities and eyes. Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization.
- Joel Guevara, W. L. (Abril de 2008). *Incertidumbre de la Regresión Lineal*. Obtenido de <http://insertidumbre-reg-lin.blogspot.com/>
- La Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM). (2012). *Estimación de Incertidumbre*.
- Laboratorio de Calibración Dosimétrica LCD. (s.f.). *Ficha de Equipo*. Managua.
- Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (Laboratorio de Dosimetría Externa). (03 de 08 de 2019). INSTRUCTIVO CARACTERIZACIÓN DE DOSÍMETROS. Managua, Nicaragua.
- Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología (Laboratorio de Dosimetría Externa). (27 de 11 de 2020). LDE-IT-03 INSTRUCTIVO DE CALIBRACIÓN DEL FACTOR DE SENSIBILIDAD DEL LECTOR. Managua.
- LAF-RAM. (2019). *MANUAL CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS*. Managua: LAF-RAM.
- MIRION TECHNOLOGIES (RADOS). (2009). *RE-2000 TLD READER USER MANUAL Version 1.41*.
- MIRION TECHNOLOGIES. (2008). *Win TLD PRO 1235-122 manual del usuario versión 4*. RADOS Technology.
- Normalización, (. 1. (2015). *(ISO 15382:2015) Protección Radiológica Procedimientos para vigilar las dosis en el cristalino, la piel y las extremidades*. Genova: AENOR.
- OIEA. (Febrero de 2004). Evaluación de la exposición ocupacional debida a fuentes externas de radiación. Viena, Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Optimización de Protección Radiológica del personal médico (ORAMED). (2008-2011). *Report on revision of the Hp(3) operational quantity implementation, Conversion coefficients, Type test and Calibration procedures*. Barcelona.
- Palop, J. V. (2016). *Características del dosímetro cristalino requerido por el centro nacional de dosimetría*. Valencia: Centro Nacional de Dosimetría(INGESA).
- Pirchio, S. D. (2010). Estudios dosimétricos del cristalino del ojo usando un nuevo dosímetro. *Estudios dosimétricos del cristalino del ojo usando un nuevo dosímetro-encuestas en dos departamentos de radiología intervencionista de la Ciudad*. Argentina, Buenos Aires.
- Piura, J. (2012). *Metodología de la Investigación Científica*. Managua.
- Radcard. (s.f.). *EYE-D*. Obtenido de www.Radcard.pl
- RADOS RadPro International GmbH. (s.f.). *...Radiation Protection for the Radiation Professionals... TLD & OSL*. Obtenido de www.radpro-int.com
- Rivera, T. (Septiembre de 2011). *TERMOLUMINISCENCIA EN DOSIMETRÍA MÉDICA*. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada-IPN. D.F, México, México.

- Roberto Hernández Sampieri, C. F. (2014). Metodología de la investigación (quinta edición). México D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Rodríguez, S. G. (2001). *Método de cuadrados mínimos*. Madrid.
- Ruiz, L. H. (Diciembre de 2010). Dosimetría termoluminiscente en radiología diagnóstica veterinaria. Ciudad de México, México.
- S.del Sol Fernández, R. G. (2015). *Comportamiento dosimétrico de dosímetros termoluminiscentes a bajas dosis en Radiodiagnóstico*. México.
- Samiñón, M. (2015). *verificación de los niveles de dosis recibida por personal técnico del servicio de Medicina Nuclear Diagnóstica de FUESMEN*. Balseiro.
- Sociedade Brasileira de Metrologia. (02 de febrero de 2011). *Mensurando según item 2.3*. Obtenido de <http://bom.org.br:8080/jspui/bitstream/2050011876/255/1/DOC-15513-03-ESP-Mensurando.pdf>
- Souza, S. O. (2019). Novos materiais dosimétricos para aplicações em Física Médica. *Revista Brasileira de Física Médica*, 10.
- Tamayo, C. B. (2011). *REQUISITOS TÉCNICOS Y ADMINISTRATIVOS PARA LOS SERVICIOS DE DOSIMETRÍA PERSONAL DE RADIACIÓN EXTERNA*. Perú: Oficina Técnica de la Autoridad Nacional.
- The International Commission on radiation units and measurements (ICRU). (2017). *OPERATIONAL QUANTITIES FOR EXTERNAL RADIATION EXPOSURE*. Published by Oxford University Press.
- The International Commission on Radiation Units and Measurements and The International Commission on Radiological Protection. (2017). *Operational Quantities for External Radiation Exposure*. ISBN, Oxford University Press.
- Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. NIPO: 074-13-004-1 (EDICIÓN DIGITAL).
- Wolfgang, Schmid, & Lazos Martínez, R. (2000). *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*. México.

5.4 Anexo

Tabla 21 - Requisitos de funcionamiento para dosímetros Hp (3) (Tomado de la norma IEC 62387:2012)

Line	Characteristic under test	Main characteristics or mandatory measuring range or mandatory range of influence quantity	Performance requirement for the rated range	Clause/ Sub-clause
1	Capability of the dosimetry system	Measuring range; influence quantities; t_{max} ; model function	To be documented by the manufacturer for the type test	7
2	Requirements to the design of the dosimetry system	Dose indication; information on reader, dosimeter and evaluation algorithm	To be documented by the manufacturer for the type test and checked during type test	8
3	Effects of radiation not intended to be measured	Response to thermal neutrons, ^{252}Cf and ^{252}Cf (D_2O -moderated)	Response to be stated by the manufacturer	8.7
4	Instruction manual	Information for correct use; information about the performance of the system	To be documented by the manufacturer for the type test and checked during type test	9
5	Software, data and interfaces	Authenticity of the software; correctness and integrity of data	To be documented by the manufacturer for the type test and checked during type test	10
6	Coefficient of variation, v	$H < 0,1 \text{ mSv}$ $0,1 \text{ mSv} \leq H < 1,1 \text{ mSv}$ $H \geq 1,1 \text{ mSv}$	15 % (16 - $H/0,1 \text{ mSv}$) % 5 %	11.2
7	Relative response due to non-linearity	$0,1 \text{ mSv} \leq H \leq 1 \text{ Sv}$	-9 % to +11 %	11.3
8	Overload, after-effects, and reusability	10 times the upper limit of the measuring range: $10 \cdot H_{up}$, however at maximum 10 Sv. Reused dosimeters shall fulfil the requirements	Perception to be off-scale on the high end side of the measuring range, after-effects may not cause fault measurements and $v(H_{low})$ shall be according to line 6	11.4
9	Relative response due to mean photon radiation energy and angle of incidence	30 keV to 250 keV and 0° to $\pm 60^\circ$ from reference direction	$r_{min} = 0,71$ to $r_{max} = 1,67$	11.6.1
10	Relative response, r , due to mean beta radiation energy	0,8 MeV and 0° to $\pm 60^\circ$ from reference direction	$r_{min} = 0,71$ to $r_{max} = 1,67$	11.6.2
11	As in lines 9 and 10 but new reference direction opposite to that one used	See lines 9 and 10, if no statement by the manufacturer	See lines 9 and 10, if no statement by the manufacturer	8.4 f)
12	Radiation incidence from the side of the dosimeter	Radiation incidence from 60° to 120°	Indication less than 2 times of indication due to irradiation free in air from the front	11.8
13	Response to mixed irradiations	Irradiation with different radiation qualities	Response within ranges of radiation qualities under test	12
14	Total effect due to environmental performance requirements	Temperature, light, time; for details, see Table 13	See Table 13	13
15	Deviation due to electromagnetic performance requirements	See Table 14	See Table 14	14
16	Deviation due to mechanical performance requirements	Drop; for details, see Table 15	$\pm 0,7 \cdot H_{low}$ at a dose of $H = 7 H_{low}$	15

NOTE The non-symmetrical borders of relative responses r are derived from symmetrical borders of correction factors ($1/r$), for example: $\pm 40 \%$ for $1/r \in [0,6 \dots 1,4] \rightarrow r \in [1/1,4 \dots 1/0,6] = [0,71 \dots 1,67]$

Tabla 22 - Coeficiente de conversión recomendado $H_{pK}(3; S, \alpha)_{cyl}$ de kerma en aire, K_a , a la dosis equivalente $H_p(3)$ para el maniquí de cilindro que consta de tejido ICRU (Tomado de la norma ISO 4037-3:2019)

Radiation quality	PMMA build-up layer		$h_{pK}(3; S, \alpha)_{cyl}$ in Sv/Gy for a distance of 2,5 m and the angle of incidence, α , of						
	d_{PMMA}	k_{PMMA}							
	mm		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
S-Cs	3	1,00	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	1,19	1,11
S-Co	3	1,00	1,14	1,14	1,14	1,15	1,16	1,15	1,10

Tabla 23: Valores de C_1 y C_2 para w valores diferentes de dosis y n indicaciones para cada valor de dosis. (Tomado de la norma IEC 62387:2012)

w	Value of c_1 for n equal							w	Value of c_2 for n equal						
	4	7	10	15	20	25	∞		4	7	10	15	20	25	∞
5	1.000	1.007	1.009	1.009	1.009	1.009	1	5	1.499	1.400	1.344	1.290	1.255	1.231	1
6	1.058	1.051	1.046	1.039	1.035	1.032	1	6	1.572	1.454	1.389	1.326	1.287	1.261	1
8	1.147	1.117	1.100	1.084	1.074	1.067	1	8	1.687	1.536	1.458	1.383	1.336	1.304	1
10	1.215	1.166	1.141	1.117	1.102	1.092	1	10	1.772	1.597	1.508	1.423	1.372	1.335	1
12	1.269	1.205	1.173	1.143	1.124	1.112	1	12	1.840	1.645	1.548	1.455	1.399	1.360	1
14	1.315	1.238	1.200	1.164	1.142	1.128	1	14	1.895	1.684	1.578	1.480	1.421	1.379	1
16	1.354	1.265	1.222	1.182	1.158	1.142	1	16	1.940	1.716	1.605	1.502	1.440	1.396	1
18	1.388	1.289	1.242	1.211	1.171	1.153	1	18	1.980	1.743	1.628	1.409	1.453	1.409	1
20	1.418	1.311	1.259	1.233	1.183	1.164	1	20	2.015	1.767	1.646	1.394	1.466	1.421	1
25	1.483	1.355	1.295	1.240	1.210	1.186	1	25	2.081	1.812	1.683	1.563	1.445	1.444	1
50	1.683	1.494	1.407	1.328	1.283	1.252	1	50	2.275	1.945	1.789	1.646	1.561	1.504	1

Tabla 24: Ejemplo del cálculo de incertidumbre para el punto de dosis de 300 μSv

Magnitud	Mejor estimado		Valor absoluto de σ o s		tipo Distribucion	Incertidumbre típica, u_i		Coeficiente de sensibilidad, c		Contribucion a la incertidumbre estandard, u		contribucion a la incertidumbre relativa	Grados de Libertad	Contribución a la incertidumbre	U_i^4/V_i
CB	64123	0,5	4551,1	cuentas	Std, deviation	4551,128	cuentas	0,001	$\mu\text{Sv}/\text{cuentas}$	2,783	μSv	10,4%	9	0,011	6,67E+00
Cz	8127,5		288,13	cuentas	Std, deviation	288,128	cuentas	-0,001	$\mu\text{Sv}/\text{cuentas}$	0,176	μSv	0,7%	9	0,000	1,07E-04
KZ	350,1426		12	$\mu\text{Sv}/\text{vuelta}$	Std, deviation	12,000	$\mu\text{Sv}/\text{vuelta}$	1,11	vuelta	13,269	μSv	49,4%	9	0,244	3,44E+03
Ki	1,022624		0,0074		Std, deviation	0,007		-378,61	μSv	2,808	μSv	10,5%	9	0,011	6,91E+00
KR	673156,8		7204,9	cuentas/vuelta	Std, deviation	7204,938	cuentas/vuelta	-0,0006	$\mu\text{Sv}/\text{vueltas}/\text{cuentas}$	4,144	μSv	15,4%	12	0,024	2,46E+01
Kf	1,0609		0,003		Gaussian	0,001		364,95	μSv	0,365	μSv	1,4%	10000	0,000	1,77E-06
KE	1,116559		0,195		Gaussian	0,065		346,76	μSv	22,539	μSv	83,9%	10000	0,705	2,58E+01
KL	1,015		0,0004		Rectangular	0,000		381,45	μSv	0,088	μSv	0,3%	10000	0,000	6,02E-09
BG	11,5		3		Std, deviation	2,000		-1,00	μSv	2,000	μSv	7,4%	6	0,006	2,67E+00
Hp(3)	375,68	μSv				26,85	μSv					7,15%		1,000	3511,23
													V EFF	k	Uex(95%)
													148,079	2	53,71