# UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

# FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS

# ESCUELA PROFESIONAL DE FISICA

**TESIS**

‘‘Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire para una fuente de Ir-192 y Validación del sistema de planificación Brachyvision para braquiterapia de alta tasa de dosis’’

Para optar el Título Profesional de:

**LICENCIADO EN FÍSICA**


**Tesista:**

Bach.Fis. Jerry Astrid Rivera Barco

**Asesor Metodológico**

M.Sc Saba Effio Augusto

**Asesor Especialidad**

M.Sc Mori Rojas Juan José


**Lambayeque 02 de setiembre de 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**

**FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE FISICA**

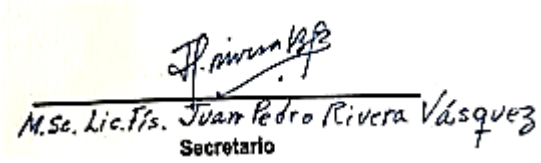
**TESIS**

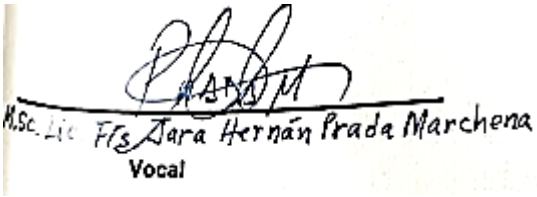
‘‘Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire para una fuente de Ir-192 y Validación del sistema de planificación BrachyVision para braquiterapia de alta tasa de dosis’’

Para optar el Título Profesional de:

**LICENCIADO EN FÍSICA**



M.Sc. Lic.Fís. Augusto Saba Effio

**Asesor**



**Bach. RIVERA BARCO JERRY ASTRID**

**Tesista**

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**
**FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS**
**D E C A N A T O**
Ciudad Universitaria – Lambayeque
**LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD**

0114

# ACTA DE SUSTENTACIÓN Nº .71.-202.6.-D/FACFyM

Siendo las 12:15 PM del día 02 de Septiembre del 2026 se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada: "Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire para una fuente de Ir-192 y validación del sistema de planificación BrachyVision para braquiterapia de alta tasa de dosis"

Designados por Resolución N° 1157-2025- D/FACFyM de fecha 10 de diciembre de 2025

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Dr. Lic. Fís. Arnulfo Cieza Ramos — Presidente
M.Sc. Lic. Fís. Juan Pedro Rivera Vásquez — Secretario
M.Sc. Lic. Fís. Jara Hernán Prada Marchena — Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) M.Sc. Lic. Fís. Augusto Saba Effio, nombrado por Resolución N° 1038-2025- D/FACFyM de fecha 31 de Octubre de 2025.

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 618-2026- D/FACFyM de fecha 31 de agosto de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Rivera Barco Jerry Astrid y tuvo una duración de 45 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de Diecisiete (17) en la escala vigesimal, mención (Bueno).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Licenciado en Física, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 01:00 PM se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Dr. Lic. Fís. Arnulfo Cieza Ramos
**Presidente**

M.Sc. Lic. Fís. Juan Pedro Rivera Vásquez
**Secretario**

M.Sc. Lic. Fís. Jara Hernán Prada Marchena
**Vocal**

M.Sc. Lic. Fís. Augusto Saba Effio
**Asesor**

# *CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD*

Yo, Saba Effio Augusto, usuario revisor del documento titulado Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire para una fuente de Ir-192 y Validación del sistema de planificación Brachyvision para braquiterapia de alta tasa de dosis

Cuyo autor es (son): Jerry Astrid Rivera Barco

Identificado con Documento de Identidad 77478881; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de 14 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 14 de agosto de 2026



---

FIRMA

NOMBRES Y APELLIDOS: Augusto Saba Effio

DNI: 16600649

INFORME DE ORIGINALIDAD

| 14% | 14% | 2% | 4% |
|---|---|---|---|
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUD |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|---|---|
| 1 | repositorio.unal.edu.co | Fuente de Internet |
| 2 | dspace.espoch.edu.ec | Fuente de Internet |
| 3 | www-pub.iaea.org | Fuente de Internet |
| 4 | ri.ues.edu.sv | Fuente de Internet |
| 5 | doi.org | Fuente de Internet |
| 6 | hdl.handle.net | Fuente de Internet |
| 7 | Submitted to ECCI | Trabajo del estudiante |
| 8 | repository.unipiloto.edu.co | Fuente de Internet |
| 9 | www.bdigital.unal.edu.co | Fuente de Internet |
| 10 | biblioteca.usac.edu.gt | Fuente de Internet |
| 11 | repositorio.unprg.edu.pe:8080 | Fuente de Internet |
| 12 | Submitted to Universidad de San Martín de Porres | Trabajo del estudiante |
| 13 | bibliotecadigital.oducal.com | Fuente de Internet |
| 14 | worldwidescience.org | Fuente de Internet |
| 15 | evkx.net | Fuente de Internet |

FIRMA

**ASESOR: AUGUSTO SABA EFFIO**

**DNI: 16600649**

| | |
|---|---|
| 16 | pdfcookie.com<br>Fuente de Internet |
| 17 | sexonzyman43.weebly.com<br>Fuente de Internet |
| 18 | sportdocbox.com<br>Fuente de Internet |
| 19 | bdigital.unal.edu.co<br>Fuente de Internet |
| 20 | Submitted to Ilerna Online Blackboard<br>Trabajo del estudiante |
| 21 | dspace.kocaeli.edu.tr:8080<br>Fuente de Internet |
| 22 | doczz.es<br>Fuente de Internet |
| 23 | file.scirp.org<br>Fuente de Internet |
| 24 | uvadoc.uva.es<br>Fuente de Internet |
| 25 | repositorio.unprg.edu.pe<br>Fuente de Internet |
| 26 | pt.scribd.com<br>Fuente de Internet |
| 27 | Submitted to Weston College<br>Trabajo del estudiante |
| 28 | IFMBE Proceedings, 2009.<br>Publicación |
| 29 | Peter J. Hoskin, Dimos Baltas, Ali S. Meigooni, Christian Kirisits. "Comprehensive Brachytherapy - Physical and Clinical Aspects", CRC Press, 2026<br>Publicación |
| 30 | di.univ-blida.dz<br>Fuente de Internet |
| 31 | inba.info<br>Fuente de Internet |
| 32 | Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA<br>Trabajo del estudiante |



FIRMA

**ASESOR: AUGUSTO SABA EFFIO**

**DNI: 16600649**

33 Ben Mijnheer. "Clinical 3D Dosimetry in Modern Radiation Therapy", CRC Press, 2017
Publicación

34 Emily Simpson-Page, Lynsey Hamlett, Dominika Lew, Holly Stephens, Rachael Wilks, Tai Kairn, Scott B. Crowe. "3D printed brachytherapy jig for Reference Air Kerma Rate calibration", Physical and Engineering Sciences in Medicine, 2021
Publicación

| | | | |
|---|---|---|---|
| Excluir citas | Apagado | Excluir coincidencias | < 15 words |
| Excluir bibliografía | Apagado | | |



FIRMA

**ASESOR: AUGUSTO SABA EFFIO**

**DNI: 16600649**

turnitin

# Recibo digital

Este recibo confirma quesu trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

| | |
|---|---|
| Autor de la entrega: | Jerry Rivera |
| Título del ejercicio: | Quick Submit |
| Título de la entrega: | tesis 2026 |
| Nombre del archivo: | TESIS_2026.pdf |
| Tamaño del archivo: | 4.24M |
| Total páginas: | 107 |
| Total de palabras: | 13,708 |
| Total de caracteres: | 81,244 |
| Fecha de entrega: | 03-jul-2026 12:52a. m. (UTC-0500) |
| Identificador de la entrega: | 2992883998 |



FIRMA

**ASESOR: AUGUSTO SABA EFFIO**

**DNI: 16600649**

Derechos de autor 2026 Turnitin. Todos los derechos reservados.

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Bach. Rivera Barco Jerry Astrid investigador y MSc. Saba Effio Augusto, asesor del trabajo de investigación "Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire para una fuente de Ir-192 y validación del sistema de planificación Brachyvision para braquiterapia de alta tasa de dosis", declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso de demostrarse lo contrario, asumiremos responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiera lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, Abril del 2026

**INVESTIGADOR**:

Bach. Rivera Barco Jerry Astrid

**Bach. RIVERA BARCO JERRY ASTRID**
**Tesista**

**ASESOR**:

M. Sc. Saba Effio Augusto

M.Sc. Lic.Fís. Augusto Saba Effio
**Asesor**

## DEDICATORIA

A ti, mamá.

Porque eres quien nunca suelta mi mano, aun cuando yo mismo dudo de poder seguir.

Porque, mientras otros se alejaban o juzgaban, tú siempre estuviste ahí, con lo poco que tenías y con todo tu amor, recordándome que aun podía llegar.

Este trabajo no es solo el cierre de una etapa, es el reflejo de cada consejo tuyo, de cada sacrificio silencioso y de cada madrugada en la que me diste animo sin entender del todo lo que hacía, pero creyendo siempre que lo lograría.

Me retrasé, tropecé, quise rendirme, pero tu voz siempre me levanto.

Hoy, cada página de este trabajo lleva un pedazo de ti: de tu fuerza, tu fe y tu esperanza.

Este trabajo es tuyo, mamá. Por todo lo que hiciste, por todo lo que sigues haciendo y por todo lo que soy gracias a ti.

## AGRADECIMIENTO

De igual forma, agradezco profundamente al MSc. Físico Médico Juan José Mori Rojas, por su tiempo, guía y supervisión durante el desarrollo de este trabajo, así como por su constante motivación y apoyo. Asimismo, extiendo mi gratitud al MSc. Saba Effio Augusto, por su valioso asesoramiento, compromiso y orientación en cada fase de esta investigación.

También estoy sinceramente agradecido con mis compañeros Renzo Calvay y Adrián de la Cruz por compartir su experiencia con disposición y compañerismo.

A mis hermanas, Milene y Yenny, alentándome siempre a no rendirme. Su apoyo incondicional fue parte esencial para alcanzar este logro.

Gracias a todos.

INDICE

DEDICATORIA ..... i
AGRADECIMIENTO ..... ii
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS ..... ix
RESUMEN ..... xi
ABSTRACT ..... xii
INTRODUCCION ..... xiii
CAPITULO I: DISEÑO TEORICO ..... 16
1.1 ANTECEDENTES ..... 16
1.2 BASE TEORICA ..... 18
1.2.1. Conceptos generales de braquiterapia ..... 18
1.2.1.1. Definición y principios básicos ..... 18
1.2.1.2. Clasificación según la tasa de dosis y permanencia ..... 18
1.2.1.3. Ventajas y limitaciones frente a la radioterapia externa ..... 20
1.2.1.4. Radiobiología en Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis (HDR) ..... 20
1.2.1.5. Dosis Biológica Efectiva (BED) en HDR ..... 20
1.2.2. Evolución histórica y radionúclidos ..... 21
1.2.2.1. Hitos en el desarrollo de radionúclidos ..... 21
1.2.2.2. Sustitución del Radio-226 por Cesio-137 ..... 21
1.2.2.3. Transición hacia fuentes selladas modernas e Iridio-192 ..... 21
1.2.2.4. Evolución de los Sistemas de Carga Diferida (Afterloaders) ..... 22
1.2.2.5. Tecnología GammaMed Plus ..... 22
1.2.2.6. Sistema Bravos: La Nueva Generación de Braquiterapia ..... 22
1.2.2.7. Comparativa de Radionúclidos en HDR: Co-60 vs. Ir-192 ..... 23
1.2.3. Física del Radioisótopo Ir-192 ..... 23
1.2.3.1. Propiedades Atómicas y Nucleares ..... 23
1.2.3.2. Diseño Estructural y Encapsulamiento de la Fuente de Ir-192 ..... 24
1.2.3.3. Influencia de la Geometría de la Fuente en la Distribución de Dosis ..... 24
1.2.3.4. Esquema de Desintegración y Espectro de Energía ..... 24
1.2.3.5. Periodo de Semidesintegración y Actividad ..... 25
1.2.4. Interacción de la Radiación Gamma con la Materia ..... 25
1.2.4.1. Coeficientes de Atenuación ..... 25
1.2.4.2. Efecto Fotoeléctrico ..... 25

1.2.4.3. Efecto Compton (Dispersión Inelástica) ..... 26
1.2.4.4. Producción de Pares ..... 26
1.2.5. Formalismo Dosimétrico TG-43 (AAPM) ..... 26
1.2.5.1. Evolución del Formalismo ..... 26
1.2.5.2. Ecuación General de Tasa de Dosis ..... 26
1.2.5.3. Parámetros Constituyentes: ..... 27
1.2.5.4. Análisis Profundo de los Parámetros del TG-43 ..... 27
1.2.6. Instrumentación Dosimétrica para Braquiterapia HDR ..... 28
1.2.6.1. Cámaras de Ionización Tipo Pozo (Well-type Chambers) ..... 28
1.2.6.2. Cámara Standard Imaging HDR1000 Plus ..... 29
1.2.6.3. Electrómetro Standard Imaging CDX 2000B ..... 29
1.2.6.4. Punto de Máxima Respuesta (Sweet Spot) ..... 29
1.2.7. Factores de Corrección de la Lectura Dosimétrica ..... 29
1.2.7.1. Factor de Presión y Temperatura $\boldsymbol{kTP}$ ..... 30
1.2.7.2. Factor de Recombinación Iónica ($\boldsymbol{ks}$) ..... 30
1.2.7.3. Factor de Polaridad ($\boldsymbol{kpol}$) ..... 30
1.2.7.4. Factor de Electrómetro ($\boldsymbol{kele}$) ..... 30
1.2.7.5. Teoría de la Recombinación Iónica en Cámaras Pozo ..... 30
1.2.7.6. Efecto de Polaridad en la Medición de Carga ..... 31
1.2.7.7. Trazabilidad Metrológica y Cadena de Calibración ..... 31
1.2.8. Sistema de Planificación de Tratamientos (TPS) ..... 32
1.2.8.1. El Software BrachyVision (Varian Medical Systems) ..... 32
1.2.8.2. Importancia de la Validación del TPS ..... 32
1.2.9. Accidentes en Braquiterapia y Lecciones Aprendidas ..... 33
1.2.9.1. Caso 1: Error de Identificación del Paciente (Tratamiento Nasal) ..... 33
1.2.9.2. Caso 2: Pérdida y Dispersión de Fuente Radiactiva ..... 34
CAPITULO II: DISEÑO METODOLOGICO ..... 35
2.1. Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire ..... 36
2.1.1. Control de calidad del conjunto dosimétrico ..... 36
2.1.2. Determinación del punto de máxima respuesta de la cámara de pozo ..... 37
2.1.3. Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire ..... 38
2.1.4. Comparación con el certificado de calibración ..... 40

2.1.5. Procedimiento para la validación del sistema de planificación BrachyVision ..... 41
2.1.5.1. Validación del sistema de planificación ..... 41
2.1.5.2. Configuración del plan de prueba ..... 42
2.1.5.3. Evaluación del cálculo de dosis ..... 42
2.1.6. Equipos y materiales ..... 43
2.1.6.1. Equipamiento clínico ..... 44
2.1.6.2. Conjunto dosimétrico ..... 46
2.1.6.3. Materiales de verificación diaria ..... 49
CAPITULO III: RESULTADOS ..... 52
DISCUSION DE LOS RESULTADOS ..... 70
CONCLUSIONES ..... 72
RECOMENDACIONES ..... 74
REFERENCIAS ..... 76
ANEXOS ..... 78
ANEXO A ..... 79
INFORMES DE CONTROLES FÍSICOS DIARIOS DEL AFTERLOADER ..... 79
ANEXO B ..... 84
REGISTRO DE MONITOREO RADIOLÓGICO Y PLANO DE INSTALACIÓN ..... 84
ANEXO C ..... 87
CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DEL CONJUNTO DOSIMÉTRICO ..... 87
ANEXO D ..... 92
CERTIFICACIÓN DE LA FUENTE RADIACTIVA Y PROTOCOLOS DE EMERGENCIA ..... 92
ANEXO E ..... 94
REGISTROS DE COMISIONAMIENTO Y VALIDACIÓN TRAS EL RECAMBIO DE FUENTE RADIACTIVA ..... 94
ANEXO F ..... 97
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA FASE EXPERIMENTAL ..... 97

## LISTA DE TABLAS

*Tabla 1.Tabla Comparativa de LDR, MDR y HDR* ..... *19*

*Tabla 2.Formulario para el control de calidad de Ir-192 para HDR* ..... *53*

*Tabla 3.Formulario para el control de calidad de Ir-192 para braquiterapia de alta tasa de dosis.* ..... *54*

*Tabla 4. Resumen Semanal de Posicionamiento.* ..... *55*

*Tabla 5.Pruebas de Comunicación en BATD.* ..... *57*

*Tabla 6.Pruebas a Consola de Tratamiento.* ..... *57*

*Tabla 7.Pruebas de Seguridad* ..... *58*

*Tabla 8.Pruebas Mecánicas y Medidas de Registro* ..... *59*

*Tabla 9.Datos de Identificación y Certificación de la Fuente Ir-192* ..... *59*

*Tabla 10.Cálculo de Decaimiento a la Fecha de la Medición* ..... *60*

*Tabla 11.Parámetros de Referencia del Conjunto Dosimétrico* ..... *60*

*Tabla 12.Test de corriente de Fuga del sistema dosimétrico.* ..... *61*

*Tabla 13.Determinación de la Posición de Lectura Máxima (Perfil de Cámara Pozo)* ..... *62*

*Tabla 14.Estabilidad de Lectura y Calibración de la Fuente de Ir-192.* ..... *63*

*Tabla 15.Registro de Condiciones Ambientales y Factores de Corrección* ..... *64*

*Tabla 16.Determinación Final de Tasa de Kerma y Actividad Aparente* ..... *64*

*Tabla 17.Sistema de planificación* ..... *65*

*Tabla 18.Inserción de un aplicador* ..... *66*

*Tabla 19.Ubicación de puntos de referencia para el cálculo.* ..... *66*

*Tabla 20.Resultados después de realizar el test de validación.* ..... *69*

## LISTA DE FIGURAS

*Figura 1.Equipo GammaMed Plus iX, Clínica Oncorad sede Trujillo.* ..... *44*

*Figura 2.Interfaz del sistema de planificación de tratamiento BrachyVision, Clínica ONCORAD sede Trujillo.* ..... *45*

*Figura 3.Cámara de ionización tipo pozo HDR 1000 Plus, Clínica ONCORAD sede Trujillo...* *46*

*Figura 4.Electrómetro Standard Imaging, Clínica ONCORAD sede Trujillo.* ..... *47*

*Figura 5.Barómetro y termómetro digital DBT-100, Clínica ONCORAD sede Trujillo.* ..... *48*

*Figura 6.Fantoma PermaDoc Phantom, Clínica ONCORAD sede Trujillo.* ..... *49*

*Figura 7.Tubo de transferencia utilizado para el desplazamiento de la fuente radiactiva, Clínica ONCORAD sede Trujillo.* ..... *50*

*Figura 8.Película radiográfica utilizada para la verificación del posicionamiento de la fuente, Clínica ONCORAD sede Trujillo*..... *51*

*Figura 9.Foto del Proceso de verificación de la posición de la fuente, Clínica ONCORAD sede Trujillo.* ..... *56*

*Figura 10.Variación de la lectura de corriente (nA) en función de la posición de la fuente (cm) en la Cámara de Pozo, propio del autor,*..... *63*

*Figura 11.Sistema de planificación Brachyvision.. Fuente propia del autor.*..... *65*

*Figura 12.Punto 1 en el sistema de planificación, Fuente propia del autor*..... *67*

*Figura 13.Punto 2 en el sistema de planificación, Fuente propia del autor.* ..... *67*

*Figura 14.Punto 3 en el sistema de planificación, Fuente propia del autor.* ..... *68*

*Figura 15.Recomendaciones de los valores de dosis por obtener, IPA-BV-16X-B, Febraury 2021, VARIAN.* ..... *68*

*Figura 16.Setup de medida, clínica ONCORAD sede Trujillo.* ..... *69*

## GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

- Tasa de Referencia de Kerma en Aire (TRKA): Magnitud dosimétrica fundamental que cuantifica la energía cinética transferida por unidad de masa de aire en un punto de referencia definido. Es esencial para la calibración de fuentes de braquiterapia y garantiza que la dosis administrada sea correcta.

- Iridio-192 (Ir-192): Isótopo radiactivo con una vida media de 73.83 días que emite radiación gamma de alta energía (0.136–1.06 MeV).

- Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis (HDR): Técnica de radioterapia interna que administra altas dosis de radiación en tiempos reducidos (tasa superior a 12 Gy/h) directamente al tumor o cerca de él.

- Formalismo TG-43: Algoritmo dosimétrico desarrollado por la AAPM utilizado por el sistema BrachyVision para calcular la distribución de dosis.

- TECDOC 1274 (OIEA): Protocolo internacional de la Agencia Internacional de Energía Atómica que proporciona las guías estandarizadas para la calibración de fuentes de fotones en braquiterapia y la puesta en servicio de unidades HDR.

- BrachyVision**:** Sistema de planificación de tratamiento (TPS) desarrollado por Varian que permite diseñar tratamientos personalizados mediante imágenes de CT o MRI y simular la distribución de dosis antes de la irradiación real.

- GammaMed Plus IX**:** Equipo de braquiterapia HDR computarizado encargado de transportar la fuente de Ir-192 hacia los aplicadores del paciente mediante guías flexibles.

- Cámara de Pozo: Instrumento dosimétrico utilizado para determinar la TRAK mediante la medición de la lectura ionométrica de la fuente. Debe estar calibrada y contar con factores de corrección por temperatura y presión.

- Control de Calidad (QA): Conjunto de pruebas obligatorias (mecánicas, físicas y radiométricas) realizadas antes de los tratamientos para verificar el posicionamiento de la fuente, la actividad radiactiva y la precisión del software.

- Ley del Inverso del Cuadrado: Principio físico que indica que la intensidad de la radiación (y por tanto la dosis) disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia desde la fuente, lo que exige una precisión milimétrica en el posicionamiento.

- Actividad Radiactiva: Cantidad de desintegraciones nucleares que ocurren en una fuente por unidad de tiempo. Se mide en Curies (Ci) o Becquerels (Bq).

- Factor de Corrección por Presión y Temperatura ($k_{TP}$): Coeficiente utilizado para normalizar la lectura de la cámara de ionización a las condiciones estándar de referencia (22 °C y 1013.25 mbar), compensando los cambios en la densidad del aire.

- Punto de Máxima Respuesta (Sweet Spot): Posición axial específica dentro de una cámara tipo pozo donde la recolección de carga es máxima y más estable ante pequeños desplazamientos de la fuente.

- Tiempos de Residencia (Dwell Times): Intervalos de tiempo específicos durante los cuales la fuente radiactiva permanece en una posición determinada dentro del aplicador para conformar la distribución de dosis planificada.

# RESUMEN

La braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR) es una técnica esencial en el tratamiento oncológico, cuyo desempeño depende de factores clínicos y físicos, entre ellos la precisión dosimétrica en la entrega de la dosis y la adecuada validación del sistema de planificación. En este estudio se plantea la determinación de la tasa de referencia de kerma en aire para una fuente de Ir-192 y la validación del sistema BrachyVision utilizado en la Clínica ONCORAD, sede Trujillo, con el propósito de asegurar la calidad y seguridad en los tratamientos.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, de tipo experimental y orientada a la aplicación en dosimetría clínica. Se realiza el control de calidad del conjunto dosimétrico empleado: cámara de pozo, electrómetro, barómetro y termómetro, siguiendo las recomendaciones internacionales establecidas en el IAEA TECDOC-1274 y los fundamentos del manual *Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis para Físicos* (INCA). Posteriormente, se determina la tasa de referencia de kerma en aire de la fuente mediante la metodología descrita en el TECDOC-1274 y se efectúa la verificación del sistema BrachyVision, comparando los valores calculados por el sistema de planificación con los datos de referencia proporcionados por el fabricante, bajo condiciones controladas.

Este trabajo busca contribuir al fortalecimiento del aseguramiento de la calidad en braquiterapia HDR, proporcionando un procedimiento estandarizado para la determinación y validación dosimétrica, que favorezca la trazabilidad institucional y la confiabilidad en la planificación de tratamientos.



**Palabras clave:** Braquiterapia HDR, Iridio-192, Kerma en aire, BrachyVision, Control de calidad.

## ABSTRACT

High-dose-rate (HDR) brachytherapy is a key modality in cancer treatment, whose effectiveness relies on both clinical and physical factors, particularly the dosimetric accuracy in dose delivery and the proper validation of the treatment planning system. This study focuses on determining the reference air-kerma rate of an Ir-192 source and validating the BrachyVision system used at Clínica ONCORAD, Trujillo, with the aim of ensuring the quality and safety of treatments.

The research follows a quantitative, experimental approach and is applied to clinical dosimetry. Quality control of the dosimetric system—well chamber, electrometer, barometer, and thermometer—is performed according to international recommendations from the IAEA TECDOC-1274 and the guidelines described in the *High-Dose-Rate Brachytherapy Physics Manual* (INCA). Subsequently, the reference air-kerma rate of the source is determined following the TECDOC-1274 methodology, and the BrachyVision system is verified by comparing the calculated planning values with the reference data provided by the manufacturer under controlled conditions.

This work contributes to quality assurance in HDR brachytherapy by establishing a standardized procedure for dosimetric determination and validation, strengthening institutional traceability and improving confidence in treatment planning.



**Keywords:** HDR brachytherapy, Iridium-192, Air-kerma rate, BrachyVision, Quality assurance.

# INTRODUCCION

En los servicios de radioterapia, la braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR) desempeña un papel esencial en el tratamiento de diversos tipos de cáncer, especialmente en neoplasias ginecológicas. La dispersión de los valores en la determinación de la dosis administrada cobra importancia crítica debido a que las fuentes radiactivas utilizadas como el Iridio-192 emiten altos gradientes de dosis en distancias muy pequeñas, por lo que cualquier variación en la caracterización de la fuente o en los parámetros de cálculo puede repercutir directamente en la eficacia terapéutica y en la seguridad del paciente. En este contexto, uno de los parámetros fundamentales para garantizar tratamientos confiables es la tasa de referencia de kerma en aire, magnitud que permite establecer la fuerza de la fuente bajo condiciones estandarizadas y que constituye la base para los modelos dosimétricos clínicos.

En instituciones como ONCORAD sede Trujillo, donde se realizan procedimientos de braquiterapia HDR, asegurar la correcta determinación de esta tasa y la confiabilidad del sistema de planificación es indispensable para mantener la calidad del servicio. Aunque los equipos actuales incorporan procesos automatizados de verificación, la normativa internacional enfatiza la necesidad de validaciones independientes que permitan confirmar que los cálculos realizados por el sistema de planificación en este caso, BrachyVision coincidan con los valores determinados experimentalmente mediante protocolos reconocidos, como el TECDOC 1274 del OIEA. Este tipo de evaluaciones no solo cumple un rol técnico, sino también institucional, debido a que contribuyen a la trazabilidad, estandarización y mejora continua de los tratamientos de braquiterapia.

La problemática surge de que, a pesar de su relevancia, no siempre se implementan procedimientos locales documentados para determinar la tasa de referencia de kerma en aire de

cada nueva fuente, ni se valida con regularidad el desempeño de los sistemas de planificación utilizados en la clínica. Esta ausencia de estudios específicos limita la capacidad del servicio para asegurar una adecuada correspondencia entre la caracterización física de la fuente y la dosis calculada para cada paciente. En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar un proceso sistemático que permita determinar experimentalmente la tasa de referencia de kerma en aire y evaluar la fiabilidad dosimétrica del sistema BrachyVision, alineado con las líneas de investigación de física médica, dosimetría avanzada y control de calidad en radioterapia.

La presente investigación se justifica porque contribuirá a fortalecer los procedimientos internos del servicio, proporcionará evidencia técnica aplicable a auditorías clínicas y permitirá consolidar prácticas que garanticen mayor seguridad para los pacientes. Asimismo, al documentar de manera detallada cada etapa del proceso desde el control de calidad de los instrumentos de medición hasta la verificación del cálculo del TPS se generará un material de referencia que podrá ser replicado y actualizado en futuras calibraciones o recambios de fuente.

En coherencia con esta necesidad, el estudio se orienta a determinar la tasa de referencia de kerma en aire para la fuente de Ir-192 utilizada en la clínica y a validar el sistema de planificación BrachyVision, asegurando que sus cálculos de dosis sean consistentes con los valores experimentales obtenidos. Para alcanzar este propósito general, la investigación plantea objetivos específicos relacionados con la verificación metrológica del conjunto dosimétrico empleado, la aplicación del protocolo internacional correspondiente, la evaluación cuantitativa del desempeño del TPS y la elaboración de una guía metodológica para futuras determinaciones.

Además, este estudio adquiere relevancia porque contribuye a reducir una brecha que todavía persiste en muchos centros de radioterapia del país: la falta de procedimientos sistematizados y validados para la caracterización inicial de las fuentes de braquiterapia y para la

verificación independiente del sistema de planificación. En la práctica clínica, la confianza depositada en los datos que provee el fabricante y en los algoritmos por defecto del TPS puede derivar en discrepancias no detectadas entre la dosis calculada y la dosis realmente administrada. Al implementar un proceso de medición basado en protocolos internacionales, complementado con un análisis comparativo entre mediciones y cálculos, la presente investigación no solo fortalece la cultura de control de calidad en la institución donde se desarrolla, sino que también aporta un ejemplo metodológico aplicable a otros servicios que buscan elevar sus estándares de seguridad y trazabilidad dosimétrica. Asimismo, la integración entre el trabajo experimental, la revisión normativa y la validación computacional crea un marco integral que permitirá optimizar futuras prácticas, especialmente en contextos donde la demanda de tratamientos con HDR continúa en aumento.

Finalmente, este informe se estructura de la siguiente manera: primero, se desarrolla el marco teórico y conceptual necesario para comprender los fundamentos de la dosimetría en braquiterapia HDR y la importancia del kerma en aire como magnitud de referencia. Posteriormente, se detalla el diseño metodológico empleado para realizar las mediciones y validaciones. Luego, se presentan los resultados obtenidos y su respectiva discusión. Finalmente, se exponen las conclusiones, recomendaciones y los anexos correspondientes.

# CAPITULO I: DISEÑO TEORICO

## 1.1 ANTECEDENTES

Kim, Y., et al. (2016). En su estudio titulado *"Commissioning and quality assurance of an image-based 3D brachytherapy treatment planning system"*. El objetivo fue establecer un protocolo de validación para un sistema de planificación (TPS). La metodología incluyó la comparación de dosis calculada mediante el formalismo TG-43 frente a mediciones experimentales. Los resultados reportaron incertidumbres posicionales inferiores a 0.4 mm y diferencias en dosis cercanas al 1%. El estudio concluyó que estos valores son los criterios de aceptación estándar para la puesta en marcha de sistemas como BrachyVision.

Vargas, R. (2020). En su tesis titulada *"Implementación del control de calidad dosimétrico en braquiterapia de alta tasa de dosis con fuente de Ir-192"* (Universidad Nacional Mayor de San Marcos). El objetivo fue establecer protocolos de verificación para la tasa de kerma en aire y la validación del TPS. Utilizó cámaras de pozo para contrastar los valores del sistema BrachyVision. Los resultados indicaron una concordancia superior al 98% en los puntos de dosis calculados. El autor concluyó que la validación periódica del sistema de planificación es indispensable para la seguridad radiológica en el Perú.

Orbegozo, J., et al. (2009). En la investigación *"Evaluación Dosimétrica para tratamientos usando películas radiocrómicas"* (INEN, Perú), tuvieron como objetivo validar la dosis absorbida en braquiterapia. La metodología comparó mediciones experimentales con el sistema de planificación Prowess 3000 utilizando una fuente de Ir-192. Los resultados mostraron diferencias porcentuales entre el 1% y 6%. Los autores concluyeron que la dosimetría experimental es un método eficaz para verificar la precisión de los algoritmos de cálculo del TPS.

Torres Gutiérrez, F. (2015). En su tesis *"Uso de braquiterapia de alta tasa de dosis con Ir-192 en pacientes con cáncer de cérvix en el Servicio de Radioterapia del Hospital Carlos Alberto Seguin Escobedo ESSALUD-Arequipa, 2012-2014"* (UCSM). El objetivo fue describir la seguridad y eficacia del procedimiento clínico. La metodología incluyó el seguimiento de protocolos institucionales para el uso de Iridio-192. El estudio concluyó que la braquiterapia HDR es segura siempre que se cuente con una planificación física y dosimétrica rigurosa que garantice la trazabilidad de la dosis.

Castañeda, J. (2018). En su investigación titulada *"Verificación de la tasa de kerma en aire y control de calidad en equipos de braquiterapia HDR en el norte del Perú"* (Universidad Nacional de Trujillo). El objetivo fue evaluar la constancia de la fuente de Ir-192 y los sistemas de seguridad. La metodología consistió en pruebas de posicionamiento y mediciones mensuales de tasa de kerma. Los resultados mostraron que las variaciones se mantuvieron dentro de la tolerancia del ±5%. El estudio concluyó que los controles de calidad locales aseguran la precisión necesaria para los tratamientos oncológicos regionales.

Patel, I., et al. (2005). En el estudio *"In-air calibration of an HDR Ir-192 brachytherapy source using therapy ion chambers"*. El propósito fue comparar la calibración en aire utilizando cámaras terapéuticas frente a cámaras de pozo. Los resultados reportaron discrepancias de entre -0.24% y -2.04% en relación con los valores certificados por el fabricante. La investigación confirmó que las cámaras terapéuticas pueden emplearse como sistemas de verificación secundaria confiables para la determinación del Kerma en aire.

## 1.2 BASE TEORICA

### 1.2.1. Conceptos generales de braquiterapia

#### 1.2.1.1. Definición y principios básicos

La braquiterapia es una modalidad de radioterapia en la que la fuente radiactiva se coloca directamente dentro o muy cerca del tumor. Esta técnica permite administrar dosis muy altas de radiación al volumen blanco mientras se minimiza la exposición a los tejidos sanos circundantes, aprovechando la rápida atenuación de la radiación con la distancia (IAEA, 2005; Pérez & Brady, 2019).

Los principios fundamentales que rigen esta modalidad son:

- **Proximidad a la lesión:** La fuente se sitúa en el epicentro o vecindad del tumor para maximizar la transferencia de energía.
- **Alta dosis localizada:** Incrementa la probabilidad de control tumoral mediante una entrega masiva de dosis en el área afectada.
- **Distribución controlada:** La geometría del aplicador y los tiempos de permanencia determinan el mapa de isodosis.
- **Protección de tejidos críticos:** El gradiente de dosis pronunciado reduce el riesgo de toxicidad en órganos adyacentes.

#### 1.2.1.2. Clasificación según la tasa de dosis y permanencia

La braquiterapia se categoriza principalmente por la velocidad con la que entrega la dosis:

**Baja tasa de dosis (LDR):** Tratamientos con tasas inferiores a 200 cGy/h. Generalmente requieren hospitalización del paciente debido a que la entrega de dosis dura varias horas o días.

**Media tasa de dosis (MDR):** Comprende el rango entre 200 y 1200 cGy/h. Actualmente es la modalidad menos utilizada debido al avance de los sistemas automatizados de alta tasa.

**Alta tasa de dosis (HDR):** Utiliza tasas superiores a 1200 cGy/h. La fuente posee una actividad elevada, permitiendo que el tratamiento dure solo unos minutos, facilitando procedimientos ambulatorios

*Tabla 1.Tabla Comparativa de LDR, MDR y HDR*

| Tipo | Tasa de dosis | Tiempo de tratamiento | Ventajas | limitaciones |
|---|---|---|---|---|
| LDR | < 2Gy/h | Horas/días | Efecto radiobiológico prolongando | Requiere hospitalización, supervisión constante. |
| MDR | 2-12 Gy/h | Horas | Mezcla ventajas LDR y HDR | Menos utilizada, logística compleja. |
| HDR | > 12Gy/h | Minutos | Procedimientos rápidos, ambulatorios | Requiere afterloaders y blindaje adecuado. |

*Nota.* (IAEA, 2005; AAPM TG-43, 1995)

#### 1.2.1.3. Ventajas y limitaciones frente a la radioterapia externa

La braquiterapia presenta beneficios distintivos sobre la teleterapia debido a la conformación de dosis:

- **Ventajas:** Alta precisión conformada, reducción del tiempo total de tratamiento (especialmente en HDR) y menor toxicidad sistémica en órganos distantes.
- **Limitaciones:** Alcance restringido a tumores accesibles, necesidad de procedimientos invasivos para la colocación de aplicadores y requerimientos estrictos de blindaje y equipos automatizados (afterloaders).

#### 1.2.1.4. Radiobiología en Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis (HDR)

La respuesta de los tejidos a la radiación en braquiterapia está condicionada por los mecanismos de reparación celular. Según el modelo propuesto por Joiner y van der Kogel (2018), la eficacia biológica de la radiación depende críticamente de la tasa de dosis. En la modalidad HDR, al entregarse la dosis en un tiempo muy corto, se limita la capacidad de reparación de las células durante la irradiación, lo que aumenta la efectividad del tratamiento contra el tumor, pero exige una precisión extrema en la delimitación de los órganos de riesgo.

#### 1.2.1.5. Dosis Biológica Efectiva (BED) en HDR

Para comparar diferentes esquemas de tratamiento y asegurar que la dosis sea segura, se utiliza el concepto de BED (Biologically Effective Dose). Esta magnitud permite normalizar esquemas de fraccionamiento variados a una medida común de efecto biológico. En el contexto de esta investigación, la validación del TPS asegura que el cálculo de la dosis física sea exacto, lo cual es el requisito previo indispensable para que los cálculos de BED sean clínicamente confiables y se evite la toxicidad en tejidos críticos (Dale & Jones, 2017).

### 1.2.2. Evolución histórica y radionúclidos

#### 1.2.2.1. Hitos en el desarrollo de radionúclidos

La historia de la braquiterapia está ligada a la síntesis de elementos radiactivos. Desde el descubrimiento del radio por los Curie, la técnica evolucionó con la creación del primer elemento artificial por Irène Joliot-Curie en 1934. Posteriormente, el descubrimiento del Co-60 en 1938 y la invención del ciclotrón permitieron la producción masiva de isótopos como el I-131 y el Au-198.

#### 1.2.2.2. Sustitución del Radio-226 por Cesio-137

El uso del Ra-226 presentaba riesgos críticos de protección radiológica debido a la producción de radón, un gas altamente tóxico que podía liberarse ante fracturas del encapsulado. Con el desarrollo de radioisótopos artificiales, el Cs-137 se convirtió en el sustituto estándar gracias a su energía de 0.6 MeV y su larga vida media de 30 años, permitiendo una transición segura mediante el concepto de radioequivalencia.

#### 1.2.2.3. Transición hacia fuentes selladas modernas e Iridio-192

La braquiterapia moderna se consolidó con la adopción del **Iridio-192** como el radionúclido de elección para HDR. Sus ventajas clínicas incluyen una vida media manejable de 73.8 días, una energía gamma de 0.38 MeV que permite un blindaje eficiente y una gran versatilidad para fabricar fuentes milimétricas compatibles con sistemas de carga remota.

#### 1.2.2.4. Evolución de los Sistemas de Carga Diferida (Afterloaders)

La seguridad en la braquiterapia HDR dio un salto cualitativo con el desarrollo de los sistemas de carga diferida automatizada. Según la International Atomic Energy Agency (IAEA, 2020), estos dispositivos permiten que la fuente radiactiva de alta actividad se desplace desde un contenedor blindado (safe) hasta el interior del aplicador en el paciente a través de canales de transferencia, mediante un cable guía controlado electrónicamente. Esta automatización no solo garantiza la precisión milimétrica en las posiciones de parada (*dwell positions*), sino que es el pilar fundamental de la protección radiológica del personal, al permitir la operación remota desde una consola externa (Podgorsak, 2005).

#### 1.2.2.5. Tecnología GammaMed Plus

El sistema GammaMed Plus ha sido, durante décadas, uno de los estándares en el tratamiento de HDR. Su diseño se basa en un mecanismo de indexación que permite gestionar múltiples canales de tratamiento (usualmente hasta 24). Una característica técnica relevante de este equipo es su sistema de verificación de camino de fuente, que utiliza una sonda "dummy" (fuente simulada no radiactiva) para comprobar que no existan obstrucciones en los catéteres antes de que la fuente real de Ir-192 salga del blindaje. Este protocolo reduce drásticamente el riesgo de errores mecánicos y fallos en la entrega de dosis (Varian Medical Systems, 2015).

#### 1.2.2.6. Sistema Bravos: La Nueva Generación de Braquiterapia

El sistema Bravos representa la evolución tecnológica de la plataforma GammaMed, integrando procesos de digitalización avanzada. A diferencia de sus predecesores, Bravos incorpora una tecnología de "luz de guía" en los conectores de los canales para reducir el error humano durante la conexión de los aplicadores. Además, según el reporte de la American

Association of Physicists in Medicine (AAPM, 2020), este equipo optimiza la sincronización con los sistemas de planificación mediante una interfaz de control que permite la verificación en tiempo real de los tiempos de residencia, mejorando la precisión geométrica de la fuente en trayectorias curvas y complejas.

#### 1.2.2.7. Comparativa de Radionúclidos en HDR: Co-60 vs. Ir-192

Aunque el Ir-192 es el radioisótopo predominante en la práctica clínica actual, es necesario mencionar el resurgimiento del Cobalto-60 en equipos modernos de HDR. Mientras que el Ir-192 ofrece una energía promedio de 0.38 MeV y requiere cambios de fuente cada 3 a 4 meses, el Cobalto-60 posee una energía mayor (1.25 MeV) y una vida media de 5.26 años. Esta mayor longevidad representa una ventaja logística y económica para centros con alta carga de pacientes o dificultades de importación, aunque requiere blindajes de sala más robustos debido a su mayor poder de penetración (Baltas et al., 2014).

### 1.2.3. Física del Radioisótopo Ir-192

#### 1.2.3.1.Propiedades Atómicas y Nucleares

El Iridio es un elemento de número atómico Z=77. El isótopo Ir-192 se obtiene mediante la activación neutrónica del Ir-191 estable en un reactor nuclear. Es el radionúclido preferido para HDR debido a su alta actividad específica, lo que permite el diseño de fuentes encapsuladas de dimensiones milimétricas (aprox. 3.5 mm de largo y 0.6 mm de diámetro), ideales para su inserción en catéteres y aplicadores estrechos.

#### 1.2.3.2.Diseño Estructural y Encapsulamiento de la Fuente de Ir-192

La fuente de Iridio-192 utilizada en equipos de alta tasa de dosis (HDR) consiste en un núcleo cilíndrico de material radiactivo puro o una aleación de iridio-platino. Según Nath et al. (1995), este núcleo se encuentra sellado herméticamente dentro de una cápsula de acero inoxidable soldada con láser. El propósito de este encapsulado es doble: por un lado, impide la liberación de material radiactivo al medio ambiente y, por otro, actúa como un filtro para las partículas beta de baja energía, permitiendo que solo los fotones gamma útiles atraviesen la cápsula hacia el tejido del paciente.

#### 1.2.3.3. Influencia de la Geometría de la Fuente en la Distribución de Dosis

El tamaño reducido de la fuente (aprox. 0.6 mm de diámetro) es un factor crítico para la precisión del tratamiento. Sin embargo, debido a que no es una fuente puntual perfecta, el diseño genera una anisotropía en la distribución de dosis. Esto significa que la intensidad de la radiación no es igual en todas las direcciones; la atenuación es mayor en los extremos de la cápsula debido al mayor espesor de acero que deben atravesar los fotones en el eje longitudinal. Este fenómeno físico es corregido mediante la función de anisotropía del formalismo TG-43 (Rivard et al., 2004).

#### 1.2.3.4. Esquema de Desintegración y Espectro de Energía

El Ir-192 es un emisor beta y gamma. Su proceso de desintegración es complejo:

- El 95.1% de las desintegraciones ocurren por emisión $\beta^-$ hacia niveles excitados del Platino-192.
- El 4.9% restante ocurre por captura electrónica (EC) hacia niveles excitados del Osmio-192.

El espectro gamma resultante contiene 28 líneas de energía, con un valor promedio de 0.38 MeV (rango de 0.13 a 1.06 MeV). Esta energía moderada es una ventaja crítica: permite un gradiente de dosis alto para el tratamiento, pero facilita el blindaje de la sala con espesores razonables de plomo o concreto.

#### 1.2.3.5. Periodo de Semidesintegración y Actividad

Posee una vida media $T_{1/2}$ de 73.83 días. Esto implica una constante de decaimiento λ=0.00938 $d^{-1}$. Debido a este decaimiento relativamente rápido, las fuentes de HDR deben ser reemplazadas trimestralmente en la práctica clínica para mantener tiempos de tratamiento razonables y eficiencia operativa.

### 1.2.4. Interacción de la Radiación Gamma con la Materia

#### 1.2.4.1.Coeficientes de Atenuación

Cuando los fotones del Ir-192 atraviesan un medio, su intensidad disminuye según la ley exponencial de Beer-Lambert: I=$I_0 e^{-\mu x}$, donde μ es el coeficiente de atenuación lineal. Para propósitos dosimétricos en braquiterapia, se utiliza el coeficiente de atenuación másico (μ/ρ) para independizar la medida de la densidad del medio.

#### 1.2.4.2.Efecto Fotoeléctrico

Ocurre cuando un fotón interactúa con un electrón de las capas internas del átomo, transfiriéndole toda su energía y expulsándolo (fotoelectrón). Es dominante a energías bajas. En el

caso del Iridio, este efecto es relevante en el material de encapsulamiento de la fuente (acero inoxidable) y en interfaces de alto Z.

#### 1.2.4.3.Efecto Compton (Dispersión Inelástica)

Es el mecanismo de interacción predominante en braquiterapia HDR dentro del tejido blando. El fotón choca con un electrón "libre" o débilmente ligado, cediendo parte de su energía y desviándose con una longitud de onda mayor. Este proceso es responsable de la dosis dispersa en el volumen del paciente.

#### 1.2.4.4.Producción de Pares

Este fenómeno requiere una energía mínima de 1.022 MeV. Dado que la energía promedio del Ir-192 es 0.38 MeV y solo una fracción mínima de su espectro supera el umbral, su contribución a la dosis total es despreciable en esta modalidad.

### 1.2.5. Formalismo Dosimétrico TG-43 (AAPM)

#### 1.2.5.1.Evolución del Formalismo

Antes de 1995, el cálculo de dosis se basaba en la aproximación de fuente puntual y el factor de exposición gamma. El reporte del Task Group 43 de la AAPM introdujo una metodología basada en cantidades medibles en agua, eliminando las inconsistencias de los modelos antiguos.

#### 1.2.5.2.Ecuación General de Tasa de Dosis

Para una fuente lineal, la tasa de dosis en coordenadas polares (r, θ) se expresa como:

$$\dot{D}(r,\theta) = S_K \, x \, \Lambda \, x \, \frac{G_L(r,\theta)}{G_L(r_0,\theta_o)} \, x \, gL(r) \, x \, F(r,\theta)$$

### 1.2.5.3.Parámetros Constituyentes:

- Intensidad de Kerma en Aire ($S_K$): Es la tasa de kerma en aire a una distancia de referencia (1 m), corregida por atenuación y dispersión. Se expresa en unidades de $U$ ($1cGycm^2h^{-1}$)

- Constante de Tasa de Dosis (**λ**): Define la tasa de dosis por unidad de $S_K$ en el punto de referencia (1cm,90°). Depende del diseño interno de la fuente.

- Función Geométrica ($G_L$): Describe la variación de la dosis debida únicamente a la disposición espacial de la actividad (fuente lineal o puntual), ignorando absorción y dispersión.

- Función de Dosis Radial (gL): Representa la caída de dosis a lo largo del eje transversal debido a la interacción de los fotones con el medio (agua).

- Función de Anisotropía (F): Corrige la distribución de dosis por la absorción del propio material de la fuente y su cápsula en diferentes ángulos.

### 1.2.5.4.Análisis Profundo de los Parámetros del TG-43

Para comprender la precisión de sistemas como BrachyVision, es esencial desglosar el comportamiento físico de los componentes del algoritmo:

- **Función de Dosis Radial gL(r):** Este parámetro describe la caída de la dosis en el eje transversal de la fuente debido a la atenuación de los fotones y la dispersión en

el agua. A diferencia de la ley del inverso del cuadrado de la distancia, la función gL(r) corrige los efectos del medio material. En el caso del Ir-192, esta función es cercana a la unidad para distancias cortas, lo que indica que la dispersión compensa parcialmente la atenuación en los primeros centímetros (Pérez & Brady, 2019).

- **Función de Anisotropía $F(r, \theta)$:** Representa la variación angular de la tasa de dosis. En braquiterapia de próstata o cuello uterino, donde los aplicadores pueden estar en ángulos oblicuos respecto al tejido, la precisión de $F(r, \theta)$ es vital. Errores en la modelación de la anisotropía pueden llevar a desviaciones de hasta un 10% en la dosis entregada en los extremos de la fuente (Thomadsen et al., 2005).

- **Función Geométrica $G_L(r, \theta)$:** A diferencia de los otros factores, este es puramente matemático y depende de la distribución de la actividad. Para fuentes HDR, se utiliza el modelo de "fuente lineal", que asume que la radiactividad está distribuida uniformemente a lo largo de una línea de longitud L. Esto permite un cálculo más exacto que el modelo de fuente puntual en la proximidad inmediata de la fuente (IAEA, 2005).

### 1.2.6. Instrumentación Dosimétrica para Braquiterapia HDR

#### 1.2.6.1. Cámaras de Ionización Tipo Pozo (Well-type Chambers)

Para la calibración de fuentes de alta tasa de dosis, el estándar de oro es la cámara de ionización tipo pozo. A diferencia de las cámaras cilíndricas (dedal), estas poseen un volumen sensible de aire mucho mayor (aprox. 250 $cm^3$) que rodea casi por completo a la fuente. Esto

permite recolectar corrientes de ionización del orden de los nanoamperios (nA), lo que facilita una medición estable y precisa de la Intensidad de Kerma en Aire ($S_k$).

#### 1.2.6.2.Cámara Standard Imaging HDR1000 Plus

Es la cámara utilizada en este estudio. Se caracteriza por su diseño de electrodo de recolección largo, que minimiza la dependencia de la posición de la fuente. Su construcción robusta y su respuesta lineal la hacen ideal para auditorías de calidad y calibraciones de rutina.

#### 1.2.6.3.Electrómetro Standard Imaging CDX 2000B

Es el dispositivo encargado de medir la carga recolectada por la cámara. Posee una alta resolución y estabilidad, permitiendo lecturas en modo carga (nC) o modo tasa/corriente (nA). Es fundamental que el conjunto cámara-electrómetro posea un certificado de calibración vigente con trazabilidad a un Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD).

#### 1.2.6.4.Punto de Máxima Respuesta (Sweet Spot)

Debido a la geometría interna de la cámara pozo, existe una posición axial donde la recolección de carga es máxima y la variación de la respuesta ante pequeños desplazamientos verticales es mínima. La determinación de este punto es crítica para garantizar la repetibilidad de las medidas.

### 1.2.7. Factores de Corrección de la Lectura Dosimétrica

Para convertir la lectura bruta del electrómetro ($M_{raw}$) en una medida corregida ($M_{corr}$), se deben aplicar los siguientes factores según los protocolos internacionales (IAEA TECDOC-1151).

#### 1.2.7.1.Factor de Presión y Temperatura $k_{TP}$

Las cámaras de pozo están abiertas a la atmósfera, por lo que la densidad del aire en su interior varía con las condiciones ambientales. Para normalizar la lectura a las condiciones de referencia (22 °C y 1013.25 mbar), se aplica:

$$k_{TP} = \frac{273.15 + T}{273.15 + 22} \, x \frac{1013.25}{P}$$

Donde T es la temperatura en °C y P es la presión en mbar.

#### 1.2.7.2.Factor de Recombinación Iónica ($k_s$)

Corrige la pérdida de carga debida a la recombinación de iones antes de ser recolectados por los electrodos. Se determina mediante el método de los dos voltajes ($V_{high}$ y $V_{low}$), midiendo la relación de cargas obtenidas.

#### 1.2.7.3.Factor de Polaridad ($k_{pol}$)

Corrige la diferencia en la lectura que ocurre al cambiar el signo del voltaje aplicado a la cámara. Se calcula promediando las lecturas obtenidas con polaridad positiva y negativa.

#### 1.2.7.4.Factor de Electrómetro ($k_{ele}$)

Si el electrómetro y la cámara se calibran por separado, este factor corrige la respuesta del electrómetro para asegurar que la lectura de carga sea exacta.

#### 1.2.7.5.Teoría de la Recombinación Iónica en Cámaras Pozo

Cuando la radiación ioniza el aire dentro de la cámara HDR1000 Plus, se crean pares de iones. Si el campo eléctrico aplicado no es lo suficientemente intenso, algunos iones positivos y

negativos se recombinan antes de llegar a los electrodos, lo que resultaría en una subestimación de la dosis. Según el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2002), en fuentes de alta tasa de dosis como el Ir-192, la tasa de producción de iones es muy elevada, lo que aumenta la probabilidad de recombinación inicial y general. El cálculo del factor $k_s$ mediante el método de dos voltajes permite corregir este fenómeno físico, garantizando que la carga medida represente fielmente la energía depositada.

#### 1.2.7.6.Efecto de Polaridad en la Medición de Carga

El factor $k_{pol}$ corrige las asimetrías en la recolección de carga que ocurren al invertir el potencial del electrodo. Estas diferencias pueden deberse a la emisión de electrones secundarios desde las paredes de la cámara (efecto Compton en el encapsulado) o a corrientes parásitas en el cable del electrómetro CDX 2000B. En braquiterapia HDR, donde las corrientes medidas son pequeñas (del orden de nA), cualquier mínima variación por polaridad debe ser cuantificada para cumplir con las incertidumbres menores al 2% exigidas en la práctica clínica (Almond et al., 1999).

#### 1.2.7.7.Trazabilidad Metrológica y Cadena de Calibración

La precisión de los resultados en la clínica ONCORAD sede Trujillo depende de la trazabilidad hacia un Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD). Este proceso asegura que el factor de calibración $N_k$ proporcionado por el fabricante o el laboratorio de referencia sea válido. La cadena de trazabilidad garantiza que la medida de la Intensidad de Kerma en Aire $S_k$ realizada en el hospital sea comparable con estándares internacionales, cerrando la brecha entre la teoría física y la aplicación clínica segura (IAEA, 2005).

### 1.2.8. Sistema de Planificación de Tratamientos (TPS)

El Sistema de Planificación de Tratamientos (Treatment Planning System - TPS) es un conjunto de herramientas de software y hardware que permite calcular la distribución de dosis en el paciente. Su objetivo principal es optimizar la entrega de radiación al volumen blanco (PTV) mientras se mantienen las dosis en los órganos de riesgo (OAR) por debajo de los límites de tolerancia establecidos.

#### 1.2.8.1.El Software BrachyVision (Varian Medical Systems)

BrachyVision es un sistema de planificación especializado en braquiterapia que permite la reconstrucción 3D a partir de imágenes de Tomografía Computarizada (TC) o Resonancia Magnética (RM).

- **Algoritmo de Cálculo:** Utiliza el formalismo **AAPM TG-43** para determinar la dosis puntual y volumétrica.
- **Modelado de la Fuente:** El sistema requiere la actualización constante de la actividad de la fuente de Ir-192 , calculando automáticamente el decaimiento radiactivo diario para ajustar los tiempos de parada (*dwell times*).
- **Herramientas de Optimización:** Permite ajustes manuales o automáticos de las posiciones y tiempos de la fuente para conformar la dosis según la anatomía del paciente.

#### 1.2.8.2.Importancia de la Validación del TPS

La precisión del TPS es crítica, ya que un error en el algoritmo o en la transferencia de datos de la fuente puede derivar en una subdosificación (fallo terapéutico) o sobredosificación

(toxicidad grave). Por ello, organismos como el OIEA recomiendan realizar pruebas de verificación independientes, comparando los cálculos del sistema con mediciones físicas directas, tal como se realizó en esta investigación.

### 1.2.9. Accidentes en Braquiterapia y Lecciones Aprendidas

La historia de la braquiterapia HDR ha registrado eventos adversos que subrayan la necesidad de protocolos de seguridad redundantes. La mayoría de los accidentes se deben a errores humanos, fallos en la comunicación o falta de un programa de garantía de calidad robusto.

#### 1.2.9.1.Caso 1: Error de Identificación del Paciente (Tratamiento Nasal)

En este evento, un paciente programado para braquiterapia de septum nasal fue tratado utilizando la hoja de planificación de otro paciente.

- **Consecuencia:** Recibió una sobredosis estimada entre 3 Gy y 5 Gy en el labio inferior, lo que provocó una reacción tisular severa y la suspensión del tratamiento.
- **Lección:** Es imperativo el uso de doble verificación de la identidad del paciente y de los parámetros del plan antes de iniciar la irradiación.

#### 1.2.9.2.Caso 2: Pérdida y Dispersión de Fuente Radiactiva

Este accidente ocurrió tras un tratamiento vaginal donde, por error, los catéteres fueron depositados en un contenedor de basura común en lugar del contenedor de blindaje. La fuente de Ir-192 se desprendió del cable guía.

- **Consecuencia:** La fuente terminó en una incineradora de desechos. Un trabajador recibió una dosis de 16,000 cGy y la fuente fue recuperada recién 94 días después.
- **Lección:** Se deben realizar monitoreos de radiación obligatorios al paciente y a la sala después de cada tratamiento para confirmar que la fuente ha regresado con éxito a la unidad de almacenamiento.

# CAPITULO II: DISEÑO METODOLOGICO

En la presente investigación se empleó un enfoque cuantitativo, ya que se realizaron mediciones dosimétricas experimentales con el propósito de determinar la tasa de referencia de kerma en aire de una fuente de Ir-192 utilizada en braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR), así como evaluar la precisión del sistema de planificación de tratamiento BrachyVision mediante la comparación entre valores medidos y calculados.

El estudio se clasifica como aplicado, debido a que busca generar información útil para la verificación y control de calidad en procedimientos clínicos de braquiterapia. Asimismo, presenta un diseño experimental, puesto que se realizaron mediciones directas utilizando un sistema dosimétrico compuesto por una cámara de ionización tipo pozo y un electrómetro, con el fin de obtener la tasa de kerma en aire de una fuente radiactiva de Ir-192 bajo condiciones controladas.

De igual manera, el estudio es de nivel descriptivo y comparativo, ya que se describen las mediciones obtenidas y posteriormente se comparan con los valores calculados por el sistema de planificación, permitiendo evaluar la concordancia entre ambos resultados como parte del proceso de validación del sistema.

## 2.1. Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire

### 2.1.1. Control de calidad del conjunto dosimétrico

Antes de realizar las mediciones destinadas a la determinación de la tasa de referencia de kerma en aire de la fuente de Ir-192, se efectuó la verificación del correcto funcionamiento del conjunto dosimétrico utilizado en el estudio. Este conjunto estuvo conformado por una cámara de ionización tipo pozo acoplada a un electrómetro, así como por instrumentos destinados a la medición de las condiciones ambientales, específicamente un termómetro y un barómetro.

En primer lugar, se verificó el estado operativo del electrómetro y la correcta conexión entre este dispositivo y la cámara de ionización tipo pozo, asegurando la estabilidad del sistema de medición. Posteriormente, se realizó la medición de la señal de fondo del conjunto dosimétrico con el fin de identificar posibles lecturas residuales que pudieran influir en las mediciones posteriores.

Seguidamente, se registraron las condiciones ambientales del área de medición, particularmente la temperatura y la presión atmosférica, parámetros necesarios para aplicar las correcciones correspondientes durante el cálculo de la tasa de kerma en aire.

Asimismo, se comprobó que el factor de calibración del conjunto dosimétrico se encontrara vigente y dentro de los límites de aceptación recomendados por los protocolos internacionales de dosimetría. La realización de estas verificaciones permitió garantizar el adecuado funcionamiento del sistema de medición antes de iniciar el procedimiento experimental.

### 2.1.2. Determinación del punto de máxima respuesta de la cámara de pozo

Con el objetivo de determinar la posición de máxima sensibilidad de la cámara de ionización tipo pozo utilizada en el presente estudio, se realizó un procedimiento de localización del centro efectivo del detector, seguido de un barrido axial de la fuente de Ir-192.

Inicialmente se estimó la posición aproximada del centro de la cámara de pozo a partir de la longitud del canal del sistema HDR y de las correcciones geométricas correspondientes al inserto de medición. A partir de este procedimiento se determinó una posición aproximada cercana al centro geométrico del detector.

Posteriormente, se realizó un barrido axial de la fuente dentro de la cavidad de la cámara de pozo empleando el sistema de planificación BrachyVision. Las posiciones de parada de la fuente se programaron en intervalos de 0.2 mm**,** dentro de un rango aproximado entre 124.0 mm y 126.2 mm**.**

En cada posición se registró la lectura correspondiente del electrómetro conectado a la cámara de ionización. Las lecturas obtenidas permitieron analizar la variación de la respuesta del detector a lo largo del eje longitudinal de la cámara.

A partir del análisis de los datos experimentales se identificó la posición asociada a la lectura máxima del detector, la cual corresponde al punto de máxima respuesta de la cámara de pozo**.** Esta posición fue utilizada posteriormente como punto de referencia para la determinación de la tasa de referencia de kerma en aire de la fuente.

### 2.1.3. Determinación de la tasa de referencia de kerma en aire

Una vez determinada la posición de máxima sensibilidad de la cámara de ionización tipo pozo, se procedió a determinar la tasa de referencia de kerma en aire de la fuente de Ir-192.

Toda fuente de Ir-192 instalada en un irradiador para braquiterapia de alta tasa de dosis viene acompañada de un certificado de calibración emitido por el fabricante, en el cual se reporta el valor de la tasa de referencia de kerma en aire ($K_R$), generalmente con una incertidumbre del orden de ±5 %. Esta magnitud está definida a una distancia de 1 m de la fuente.

Sin embargo, es necesario que el físico médico del servicio verifique experimentalmente este valor, ya que se han reportado casos en los que el valor informado por el fabricante difiere en más del 10 %. Discrepancias de este orden pueden provocar desviaciones en la dosis administrada durante el tratamiento de los pacientes. Por esta razón, el International Atomic Energy Agency recomienda, mediante el protocolo IAEA TECDOC-1151, realizar una calibración antes y después de cada cambio de fuente con el fin de establecer y registrar la reproducibilidad del método de calibración.

Durante las mediciones se utilizó el modo de corriente eléctrica, registrándose las lecturas del electrómetro para cada irradiación. Este modo de operación permite obtener mediciones estables y reproducibles, facilitando el registro adecuado de las lecturas.

Posteriormente se determinaron los factores de corrección necesarios para las cantidades de fluencia, tales como la recombinación iónica, la temperatura y la presión. Para ello se empleó un sistema dosimétrico compuesto por una cámara de ionización tipo pozo, un electrómetro, un termómetro y un barómetro.

El electrómetro debe permitir realizar mediciones en modo corriente y variar la tensión aplicada a la cámara. De esta manera es posible determinar el factor de corrección por recombinación iónica ($k_s$), calculado mediante la siguiente ecuación:

$$k_s = (A_{ion})^{-1} = [\frac{4}{3} - (\frac{M_1}{3M_2})]^{-1}$$

donde:

$M_1$ corresponde al promedio de las lecturas obtenidas con una tensión de +300 V

$M_2$ corresponde al promedio de las lecturas obtenidas con una tensión de +150 V

Durante la realización de las mediciones también se monitorearon la temperatura y la presión ambiente con el fin de calcular el factor de corrección por temperatura y presión ($k_{TP}$), dado por:

$$k_{TP} = \frac{273{,}15 + \overline{T}}{293{,}15} . \frac{1013{,}25}{\overline{P}}$$

donde:

$\overline{T}$ es el promedio de las lecturas de temperatura

$\overline{P}$ es el promedio de las lecturas de presión

Una vez obtenidas las mediciones y calculados los factores de corrección correspondientes, se procede a determinar la tasa de referencia de kerma en aire, expresada en cGy$m^2 h^{-1}$ , mediante la siguiente expresión:

$$\dot{k}_R = M_1 x\ 10^{-9}\ x\ N_{KR}\ x\ 10^2 x\ k_{ele}\ x\ k_{TP} x\ k_s$$

Donde:

$M_1$ es el promedio de las lecturas realizadas con una tensión de +300 V;

$10^{-9}$ corresponde al factor de conversión de nA para A;

$N_{KR}$ es el factor de calibración de la cámara pozo en Gy $m^2h^{-1}A^{-1}$;

$10^2$ es el factor de conversión de Gy para cGy;

$k_{ele}$ es el factor de calibración del electrómetro (igual a 1 cuando el electrómetro esta calibrado junto con la cámara)

$k_{TP}$ es el factor de corrección por temperatura y presion

$k_s$ es el factor de corrección por recombinación iónica.

Finalmente, el valor obtenido para la tasa de referencia de kerma en aire debe compararse con el valor reportado en el certificado de calibración del fabricante. De acuerdo con las recomendaciones del IAEA TECDOC-1151, la diferencia entre ambos valores no debe exceder aproximadamente el 3 %, considerando las incertidumbres asociadas a la medición.

### 2.1.4. Comparación con el certificado de calibración

Una vez determinada experimentalmente la tasa de referencia de kerma en aire de la fuente de Ir-192, el valor obtenido fue comparado con el valor reportado en el certificado de calibración proporcionado por el fabricante de la fuente.

Este certificado contiene el valor de la tasa de referencia de kerma en aire determinado bajo condiciones de referencia, generalmente a una distancia de 1 m de la fuente, junto con la incertidumbre asociada a la medición. La comparación entre el valor medido experimentalmente y el valor proporcionado por el fabricante permite verificar la consistencia del sistema dosimétrico

utilizado y confirmar la correcta calibración de la fuente empleada en los tratamientos de braquiterapia de alta tasa de dosis.

Para realizar esta verificación se calculó la diferencia relativa entre ambos valores, con el objetivo de evaluar la concordancia entre la medición experimental y el valor certificado. De acuerdo con las recomendaciones del International Atomic Energy Agency, establecidas en el protocolo IAEA TECDOC-1151, la discrepancia entre el valor determinado y el valor indicado en el certificado de calibración no debería exceder aproximadamente el 3 %, considerando las incertidumbres asociadas al proceso de medición.

En caso de observarse discrepancias superiores a este límite, se recomienda revisar el procedimiento de medición, los factores de corrección aplicados y el correcto funcionamiento del sistema dosimétrico antes de utilizar la fuente para la planificación y administración de tratamientos clínicos.

### 2.1.5. Procedimiento para la validación del sistema de planificación BrachyVision

#### 2.1.5.1. Validación del sistema de planificación

Con el fin de verificar los cálculos dosimétricos utilizados en la planificación de tratamientos de braquiterapia de alta tasa de dosis, se realizó la validación del sistema de planificación BrachyVision versión 16.X, empleado en el servicio de braquiterapia de la clínica ONCORAD sede Trujillo.

El sistema de planificación utiliza el formalismo dosimétrico AAPM TG-43 para el cálculo de la distribución de dosis generada por la fuente de Ir-192.

La validación del sistema se llevó a cabo mediante la creación de un plan de prueba en condiciones geométricas controladas, permitiendo comparar los valores de dosis calculados por el sistema de planificación con valores de referencia y mediciones experimentales.

#### 2.1.5.2. Configuración del plan de prueba

Para la validación del sistema se generó un plan en el sistema BrachyVision utilizando un fantoma cúbico de 25 cm de lado, el cual permitió definir una geometría homogénea para el cálculo de la distribución de dosis.

Posteriormente se insertó un aplicador virtual dentro del fantoma con una longitud total de 130 cm, ubicándose en el centro geométrico del mismo. La posición de referencia de la fuente se definió en las coordenadas (0, 0, 0) dentro del sistema de coordenadas del plan.

Una vez configurada la geometría del plan, se definieron tres puntos de referencia (estos puntos fueron seleccionados con el propósito de evaluar la distribución de dosis generada por la fuente en diferentes posiciones espaciales dentro del fantoma), alrededor de la fuente con el objetivo de evaluar la dosis calculada por el sistema de planificación a diferentes distancias.

#### 2.1.5.3. Evaluación del cálculo de dosis

Una vez configurado el plan de prueba, el sistema de planificación calculó la distribución de dosis en los puntos de referencia previamente definidos. Los valores obtenidos mediante el sistema fueron posteriormente comparados con los valores de referencia y las mediciones experimentales registradas durante la validación.

### 2.1.6. Equipos y materiales

Para la realización de las mediciones dosimétricas, la determinación de la tasa de referencia de kerma en aire y la validación del sistema de planificación, se emplearon diferentes equipos clínicos, así como el conjunto dosimétrico y materiales utilizados en las verificaciones rutinarias del servicio de braquiterapia.

Los equipos utilizados corresponden a los sistemas instalados en el servicio de braquiterapia de la clínica ONCORAD sede Trujillo, los cuales cumplen con los requisitos técnicos necesarios para la planificación y administración de tratamientos de braquiterapia de alta tasa de dosis con fuente de Ir-192.

### 2.1.6.1. Equipamiento clínico

- Equipo de braquiterapia GAMMAMED Plus ix/Ir-192




*Figura 1.Equipo GammaMed Plus iX, Clínica Oncorad sede Trujillo.*

- Sistema de planificación BrachyVision V16, utilizado para la planificación dosimétrica de los tratamientos de braquiterapia.

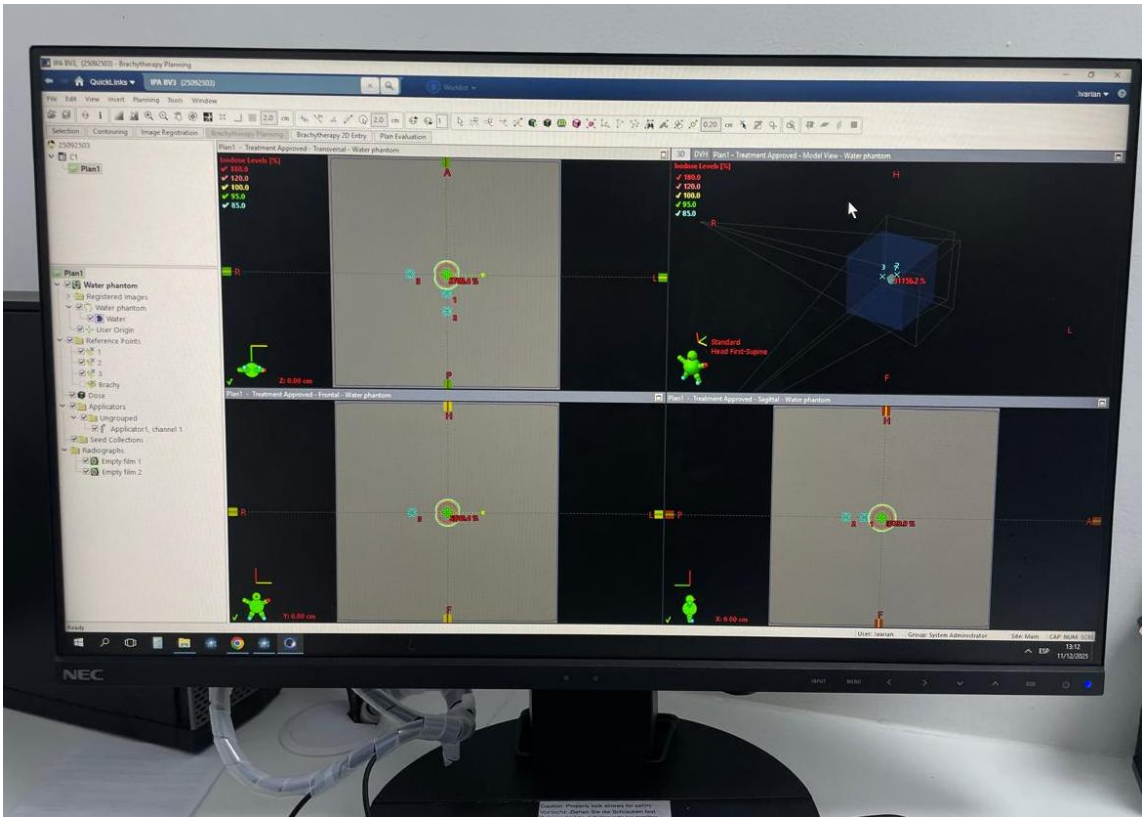


*Figura 2.Interfaz del sistema de planificación de tratamiento BrachyVision, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

### 2.1.6.2. Conjunto dosimétrico

El conjunto dosimétrico empleado para la determinación de la tasa de referencia de kerma en aire estuvo compuesto por los siguientes instrumentos de medición:

- Cámara de ionización tipo pozo

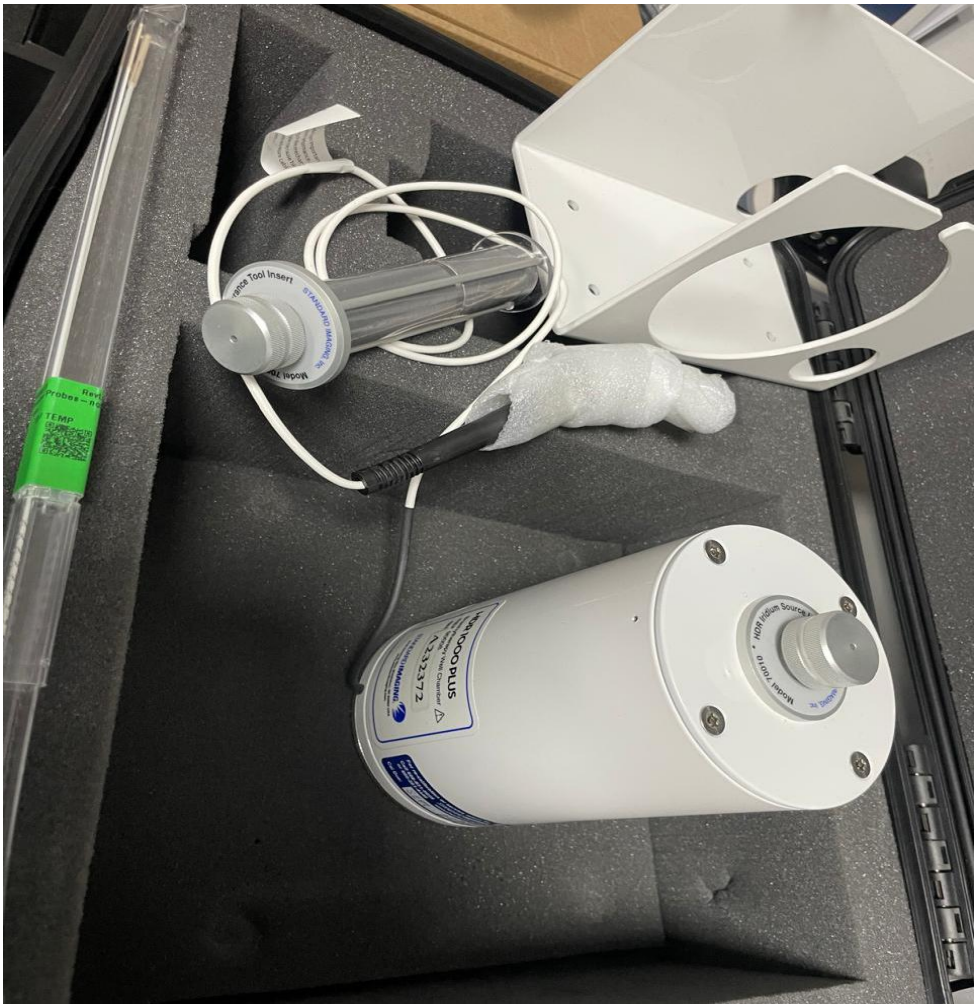



*Figura 3.Cámara de ionización tipo pozo HDR 1000 Plus, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

- Electrómetro para la lectura de corriente eléctrica generada por la cámara de ionización.




*Figura 4.Electrómetro Standard Imaging, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

- Barómetro y termómetro para el registro de la presión atmosférica durante las mediciones.




*Figura 5.Barómetro y termómetro digital DBT-100, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

### 2.1.6.3. Materiales de verificación diaria

Para la realización de pruebas de control y verificación del sistema de braquiterapia se emplearon los siguientes materiales auxiliares:

- Fantoma utilizado para la simulación de condiciones geométricas de medición.




*Figura 6.Fantoma PermaDoc Phantom, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

- Tubo de transferencia empleado para el desplazamiento de la fuente radiactiva desde el equipo hasta el aplicador o dispositivo de medición.



*Figura 7.Tubo de transferencia utilizado para el desplazamiento de la fuente radiactiva, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

- Película radiográfica utilizada para verificaciones de posicionamiento y comprobación del recorrido de la fuente.

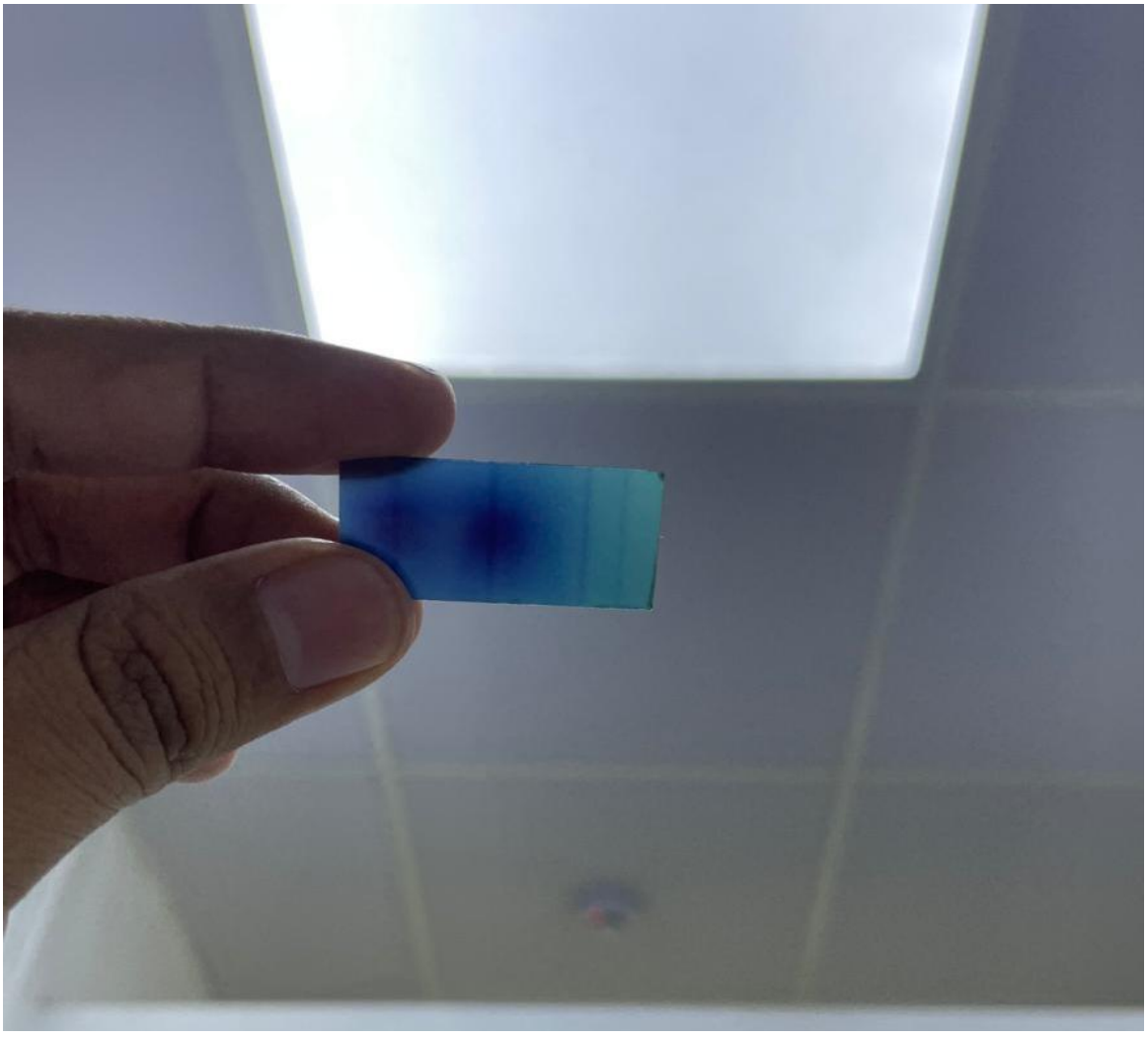


*Figura 8.Película radiográfica utilizada para la verificación del posicionamiento de la fuente, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

# CAPITULO III: RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de determinación de la tasa de referencia de kerma en aire de la fuente de Ir-192. Asimismo, se muestran los resultados correspondientes a la validación del sistema de planificación empleado para el cálculo de dosis en los tratamientos.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación se presentan a continuación, con el propósito de mostrar de manera clara la información obtenida a partir de las mediciones y verificaciones realizadas.

Equipo: GAMMAMED PLUS iX, Varian serie 1419

A) SEGURIDAD

*Tabla 2.Formulario para el control de calidad de Ir-192 para HDR*

| # | **Ítem de Inspección** | **Funcional (s/n)** |
|---|---|---|
| 1 | Indicador luminoso de la puerta | S |
| 2 | Luces de la consola del equipo | S |
| 3 | Enclavamiento de la puerta | S |
| 4 | Interruptor de emergencia en la consola | S |
| 5 | Sistema manual de retorno de la fuente | S |
| 6 | Botón de emergencia | S |
| 7 | Cambio del canal de tratamiento | S |
| 8 | Posición de la llave en la consola y en el cofre | S |
| 9 | Monitor de radiación | S |

*Nota.* Fuente propia del autor.

B) ASPECTOS MECANICOS Y ELECTRICOS

*Tabla 3.Formulario para el control de calidad de Ir-192 para braquiterapia de alta tasa de dosis.*

| # | **Ítem de Inspección** | **Funcional (s/n)** |
|---|---|---|
| 1 | Inspección de los cables | S |
| 2 | Integridad mecánica de los *dummies* y aplicadores | S |
| 3 | Circuito cerrado de TV | S |
| 4 | Intercomunicador | S |

*Nota.* Fuente propia del autor.

5 – Posicionamiento de la fuente (con filme radiográfico)

(tolerancia: 1mm), diferencia: 0.0 (o< 0.5mm)

Observaciones: Se realizó el control diario con fantoma PermaDoc y lámina. La posición de la fuente de Ir-192 coincide con la planificación en consola (posiciones 129.0 y 128.0 cm), cumpliendo con los criterios de seguridad.

*Tabla 4. Resumen Semanal de Posicionamiento.*

| Día | Fecha | Posición Programada (cm) | Diferencia Medida (mm) | Tolerancia (mm) | Estado |
|---|---|---|---|---|---|
| Martes | 04/11/2025 | 129.0 | 0.0 | 1.0 | Óptimo |
| Miércoles | 05/11/2025 | 129.0 | 0.0 | 1.0 | Óptimo |
| Jueves | 06/11/2025 | 129.0 | 0.0 | 1.0 | Óptimo |
| Viernes | 07/11/2025 | 129.0 | 0.0 | 1.0 | Óptimo |
| Martes | 11/11/2025 | 129.0 | 0.0 | 1.0 | Óptimo |

*Nota.* Los reportes detallados de control diario del GammaMedPlus iX para el periodo evaluado se encuentran adjuntos en el Anexo [A].




*Figura 9.Foto del Proceso de verificación de la posición de la fuente, Clínica ONCORAD sede Trujillo.*

Observación: El seguimiento de la estabilidad se realizó siguiendo el cronograma operativo de la institución (Oncorad - Sede Trujillo), la cual programa procedimientos de braquiterapia de martes a viernes. Se evaluó la precisión del posicionamiento desde el inicio del ciclo (04 de noviembre) hasta el siguiente periodo operativo (11 de noviembre), evidenciando que, incluso tras los periodos de inactividad programada (fines de semana y lunes), el sistema GammaMedPlus iX mantiene la calibración y la precisión en el transporte de la fuente de Ir-192 sin presentar desviaciones superiores a la tolerancia de 1.0 mm.

*Tabla 5.Pruebas de Comunicación en BATD*

| Parámetro de Prueba | Tolerancia | Val. Ref. (08/05/25) | Resultado (02/07/25) | Resultado (04/07/25) | Resultado (07/07/25) | Resultado (09/07/25) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Verificación entrada/salida datos Dicom | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Impresión de Plan | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Verificación Lista de trabajo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Verificación de Base de datos | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

*Nota.* Fuente propia del autor.

*Tabla 6.Pruebas a Consola de Tratamiento*

| Parámetro de Prueba | Tolerancia | Val. Ref. (08/05/25) | Resultado (02/07/25) | Resultado (04/07/25) | Resultado (07/07/25) | Resultado (09/07/25) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fecha y hora de consola | Correcta | Correcta | Correcta | Correcta | Correcta | Correcta |
| Actividad calculada (Ci) | 2% | 13.09 | 7.81 | 7.67 | 7.45 | 7.31 |
| Actividad en consola (Ci) | 2% | --- | 7.83 | 7.69 | 7.48 | 7.34 |
| Indicadores de interlock | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Prueba general | Completo | Completo | Completo | Completo | Completo | Completo |

*Nota.* Fuente propia del autor.

*Tabla 7.Pruebas de Seguridad*

| **Parámetro de Prueba** | **Tolerancia** | **Val. Ref.** | **Resultado (02/07/25)** | **Resultado (07/07/25)** | **Resultado (09/07/25)** |
|---|---|---|---|---|---|
| Monitor de radiación portátil | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Monitor de radiación fijo | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Contenedor de emergencia | Existente | Existente | Existente | Existente | Inexistente |
| Pinzas y alicate de emergencia | Existente | Existente | Existente | Existente | Inexistente |
| Sistema de CCTV | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Botón Last Man Out | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Interruptor de tratamiento | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Interruptor de emergencia | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Enclave de Puerta | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |
| Indicador luminoso de Puerta | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional | Funcional |

*Nota.* Fuente propia del autor.

*Tabla 8.Pruebas Mecánicas y Medidas de Registro*

| Parámetro de Prueba | Tolerancia | Val. Ref. | Resultado (02/07/25) | Resultado (04/07/25) | Resultado (09/07/25) |
|---|---|---|---|---|---|
| Guías conductoras de fuente | Integras | Integras | Integras | Integras | Integras |
| Exactitud Espacial | 1.0 mm | 0.0 mm | 0.0 mm | 0.0 mm | 0.0 mm |
| Tasa dosis fondo consola | 0.3 uSv/h | --- | 0.2 uSv/h | 0.1 uSv/h | 0.1 uSv/h |
| Tasa dosis fondo sala | 1.0 uSv/h | --- | 0.3 uSv/h | 0.3 uSv/h | 0.2 uSv/h |
| Humedad | 60-70% | 60.0% | 60.0% | 60.0% | 60.0% |
| Temperatura | 23.0 °C | 21.0 °C | 21.0 °C | 21.0 °C | 21.0 °C |

*Nota.* Fuente propia del autor.

*Tabla 9.Datos de Identificación y Certificación de la Fuente Ir-192*

| Parámetro | Detalle / Valor |
|---|---|
| **Número de Serie** | 83-001-081325-12667-09 |
| **Fecha del Certificado** | 12/02/2026 13:00 |
| **Vida Media ($T_{1/2}$)** | 73.83 días |
| **Tasa de Kerma Inicial ($K_{R0}$)** | 5.1132 cGy $h^{-1}$ a 1m |
| **Actividad Inicial ($A_0$)** | 465 GBq (12.56 Ci) |

***Nota.*** Datos obtenidos del certificado de calibración del fabricante para la fuente de Iridio-192 de alta tasa de dosis.

*Tabla 10.Cálculo de Decaimiento a la Fecha de la Medición*

| Parámetro | Valor Calculado |
|---|---|
| **Fecha de Medición** | 23/03/2026 10:35 |
| **Días Decorridos** | 38.90 días |
| **Tasa de Kerma Esperada ($K'_R$)** | 3.5488 cGy $h^{-1}$ a 1m |
| **Actividad Esperada (A)** | 322.62 GBq (8.72 Ci) |

***Nota.*** El decaimiento se calculó utilizando la constante de desintegración del Ir-192 para el intervalo de tiempo transcurrido desde la certificación.

*Tabla 11.Parámetros de Referencia del Conjunto Dosimétrico*

| Elemento | Marca / Modelo | Factor de Calibración / Constante |
|---|---|---|
| **Electrómetro** | Standard Imaging CDX 2000B | $k_{ele}$ = 0.999 nC/ue |
| **Cámara Pozo** | Standard Imaging HDR1000 Plus | $N_{KR}$= 4.721 x$10^5$ Gy $m^2$ $h^{-1}$ $A^{-1}$ |
| **Temperatura Ref. ($T_0$)** | - | 22° C |
| **Presión Ref. ($P_0$)** | - | 1013.25 mbar |

*Nota.* Los valores **($T_0$) y ($P_0$)** corresponden a las condiciones de referencia del laboratorio donde se calibró el conjunto dosimétrico. Estos valores son la base para el cálculo del factor de corrección atmosférica ($k_{P,T}$) aplicado a las mediciones locales.

*Tabla 12.Test de corriente de Fuga del sistema dosimétrico.*

| **Parámetro de Medición** | **Valor / Detalle** |
|---|---|
| **Tensión Aplicada (V)** | +300 V |
| **Lectura Inicial ($L_1$)** | 2279.80 nC |
| **Lectura Final ($L_2$)** | 2279.8 nC |
| **Tiempo Transcurrido (ΔT)** | 10 min |
| **Corriente de Fuga Calculada** | **0.000 nC** |
| **Condición de Aceptación** | **OK** |

***Nota.*** Se verificó la estabilidad del sistema durante 10 minutos bajo tensión nominal. La ausencia de variación entre la lectura inicial y final confirma que no existe corriente de fuga significativa.

*Tabla 13.Determinación de la Posición de Lectura Máxima (Perfil de Cámara Pozo)*

| Paso | Posición (cm) | Lectura Medida (nA) |
|---|---|---|
| 1 | 126.20 | 75.52 |
| 2 | 126.00 | 75.71 |
| 3 | 125.80 | 75.83 |
| 4 | 125.60 | 75.94 |
| 5 | 125.40 | 75.99 |
| 6 | **125.20** | **76.01 (Máximo)** |
| 7 | 125.00 | 75.98 |
| 8 | 124.80 | 75.92 |
| 9 | 124.60 | 75.80 |

***Nota.*** Se realizó un barrido de 9 puntos con un paso de 0.20 cm. La Posición de Referencia establecida para la calibración final es de 125.20 cm, donde se obtuvo la máxima tasa de ionización.

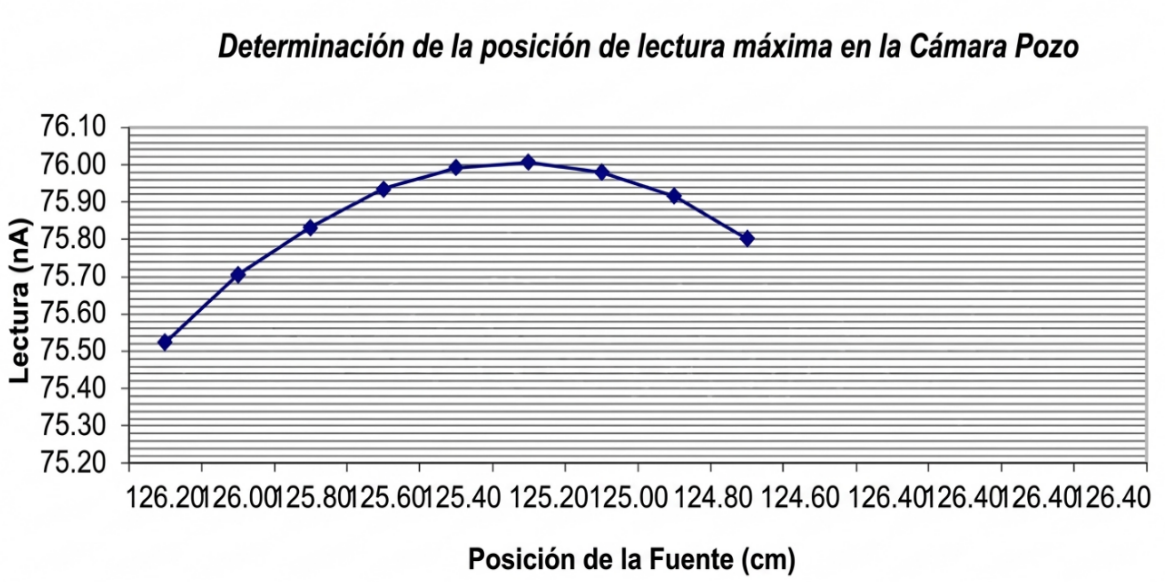



*Figura 10.Variación de la lectura de corriente (nA) en función de la posición de la fuente (cm) en la Cámara de Pozo, propio del autor,*

*Tabla 14.Estabilidad de Lectura y Calibración de la Fuente de Ir-192.*

| **Tensión aplicada (V)** | **L1 (nA)** | **L2 (nA)** | **L3 (nA)** | **L4 (nA)** | **L5 (nA)** | **Media (nA)** | **SD%** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **V = +300 V** | 76.00 | 76.00 | 76.00 | 76.00 | 76.00 | **76.00** | 0.00 |
| **V = +150 V** | 75.85 | 75.85 | 75.85 | 75.85 | 75.85 | **75.85** | 0.00 |

*Nota.* Mediciones realizadas con un tiempo nominal de parada de la fuente de 30 s con la posición de la lectura máxima de la cámara de pozo 125 cm. La desviación estándar del 0.00% en las cinco lecturas consecutivas para ambas tensiones demuestra la alta estabilidad del sistema y la repetibilidad de la fuente HDR.

*Tabla 15.Registro de Condiciones Ambientales y Factores de Corrección*

| **Parámetro ambiental** | $L_1$ | $L_2$ | **Media** | **Factor (k)** |
|---|---|---|---|---|
| **Presión (P en mbar)** | 1008.70 | 1008.70 | **1008.70** | - |
| **Temperatura (T en °C)** | 17.2 | 17.3 | **17.25** | $K_{TP}$**= 0.988** |
| **Factores Adicionales** | $A_{ion}$= 0.999 | $k_s$= 1.001 | | |

***Nota.*** Se utilizaron dos lecturas para presión y temperatura para obtener un promedio representativo durante la dosimetría. El factor $K_{TP}$ de 0.988 se aplicó para normalizar la respuesta de la cámara pozo a las condiciones estándar de referencia.

*Tabla 16.Determinación Final de Tasa de Kerma y Actividad Aparente*

| **Variable** | **Valor Medido** | **Valor Teórico** | **Desvío (%)** | **Condición** |
|---|---|---|---|---|
| **Tasa de Kerma ($K_R$)** | 3.5450 cGy m² h⁻¹ | 3.5488 cGy m² h⁻¹ | **0.11%** | **OK** |
| **Actividad Aparente (A)** | 8.71 Ci | 8.72 Ci | **0.11%** | **OK** |

*Nota.* El cálculo final muestra una discrepancia de apenas 0.11%, lo que valida satisfactoriamente el sistema de planificación BrachyVision frente a la medición física directa.

## TEST DE VALIDACION

## SISTEMA DE PLANIFICACION BRACHYVISION V16.X

*Tabla 17.Sistema de planificación*

| TPS | MARCA | VERSION | FUENTE | FORMALISMO |
|---|---|---|---|---|
| Brachyvision | VARIAN-SIEMENS | 16.X | Ir-192 | TG-43 |

*Nota.* Fuente recolectada en la clínica ONCORAD sede Trujillo.

Insertamos un plan en el sistema de planificación Brachyvision con un fantoma cubico de 25 cm de lado.

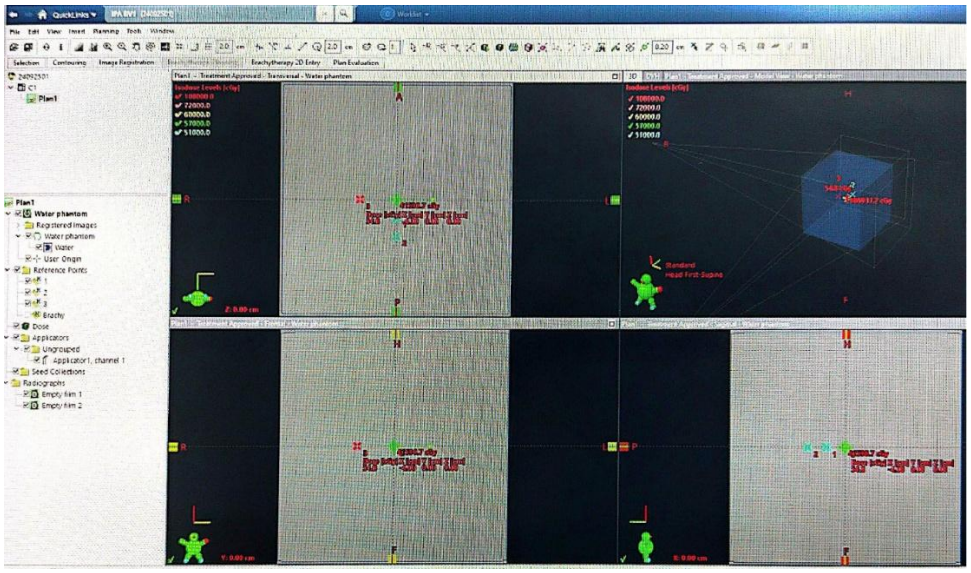


*Figura 11.Sistema de planificación Brachyvision.. Fuente propia del autor.*

*Tabla 18.Inserción de un aplicador*

| LONGITUD APLICADOR | POSICIÓN DE FUENTE | UBICACIÓN |
|---|---|---|
| 130 cm | (0, 0, 0) | Centro del fantoma |

*Nota.* Fuente propia del autor.

*Tabla 19.Ubicación de puntos de referencia para el cálculo.*

| PUNTOS | X | Y | Z |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 2 | 0 |
| 2 | 0 | 4 | 0 |
| 3 | -4 | 0 | 0 |

*Nota.* Fuente propia del Autor.

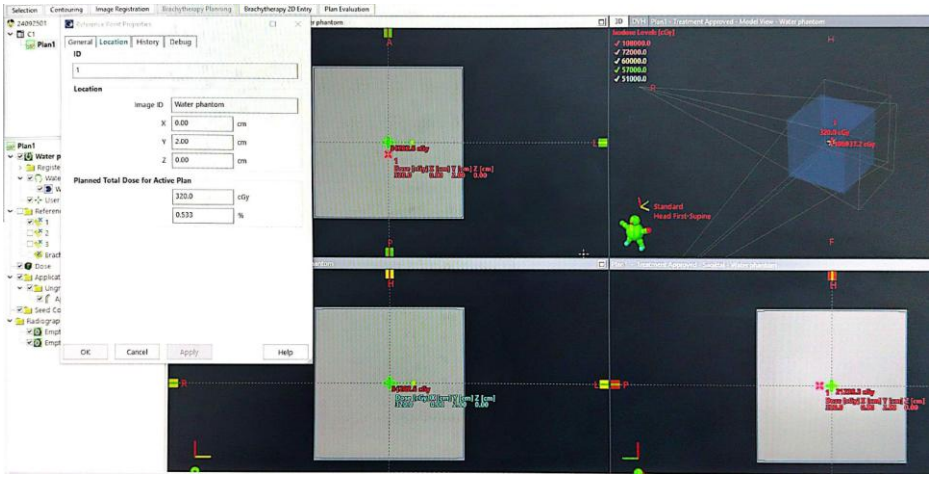



*Figura 12.Punto 1 en el sistema de planificación, Fuente propia del autor*

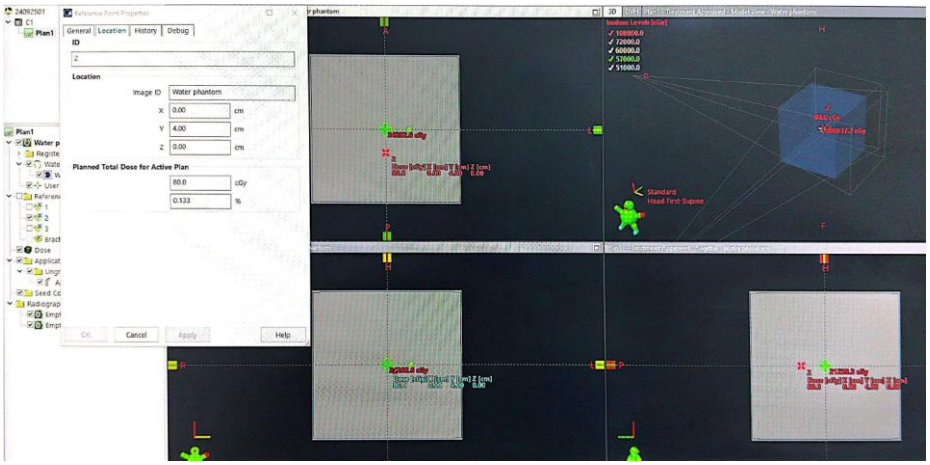



*Figura 13.Punto 2 en el sistema de planificación, Fuente propia del autor.*

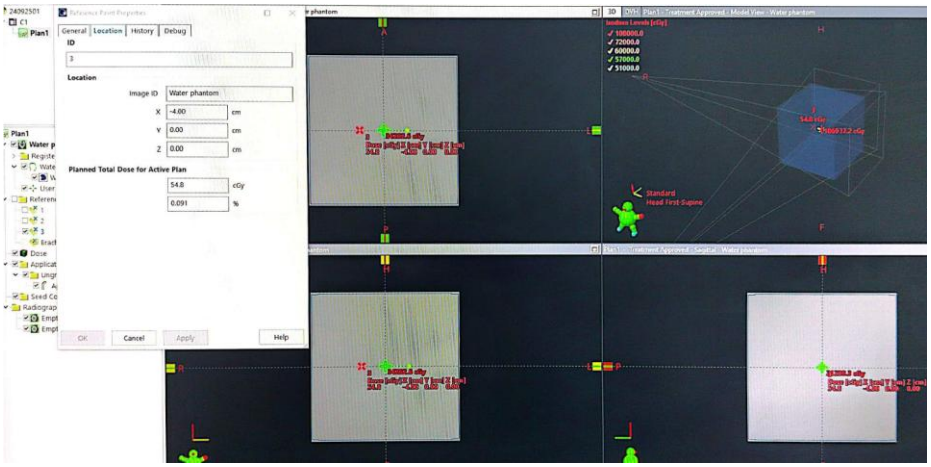


*Figura 14.Punto 3 en el sistema de planificación, Fuente propia del autor.*

| DATA TABLE: SECTION 6.2 - TP 2. TG43 DOSE CALCULATION | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NA IF MACHINE TYPE IS NOT INSTALLED | | | | | | | | | | | | |
| MACHINE TYPE | | | | | | | | | | | | |
| Reference Point Coordinates | | | VariSource Ir-192 (2012) | | | Actual Value | GM Plus HDR (2012)* | | | Actual Value | GM Plus PDR | | |
| X[cm] | Y[cm] | Z[cm] | Dose [Gy] | 2% | -2% | | Dose [Gy] | 2% | -2% | | Dose [Gy] | 2% | -2% |
| 0 | 2 | 0 | 3.157 | 3.220 | 3.094 | | 3.198 | 3.262 | 3.115 | | 3.199 | 3.263 | 3.135 |
| 0 | 4 | 0 | 0.795 | 0.810 | 0.779 | | 0.800 | 0.816 | 0.784 | | 0.800 | 0.816 | 0.784 |
| -4 | 0 | 0 | 0.479 | 0.488 | 0.469 | | 0.548 | 0.559 | 0.537 | | 0.763 | 0.778 | 0.748 |

*Figura 15.Recomendaciones de los valores de dosis por obtener, IPA-BV-16X-B, Febraury 2021, VARIAN.*

*Tabla 20.Resultados después de realizar el test de validación.*

| Punto de cálculo | | | Dosis (Gy) | | | Variación |
|---|---|---|---|---|---|---|
| X (cm) | Y (cm) | Z (cm) | Referencia | TPS | Medido | % |
| 0 | 2 | 0 | 3.198 | 3.20 | 3.24 | 1.3 |
| 0 | 4 | 0 | 0.800 | 0.80 | 0.88 | 1.1 |
| -4 | 0 | 0 | 0.548 | 0.54 | 0.55 | 1 |

*Nota.* Los valores de aceptabilidad deben encontrarse dentro de $\pm$ 2%

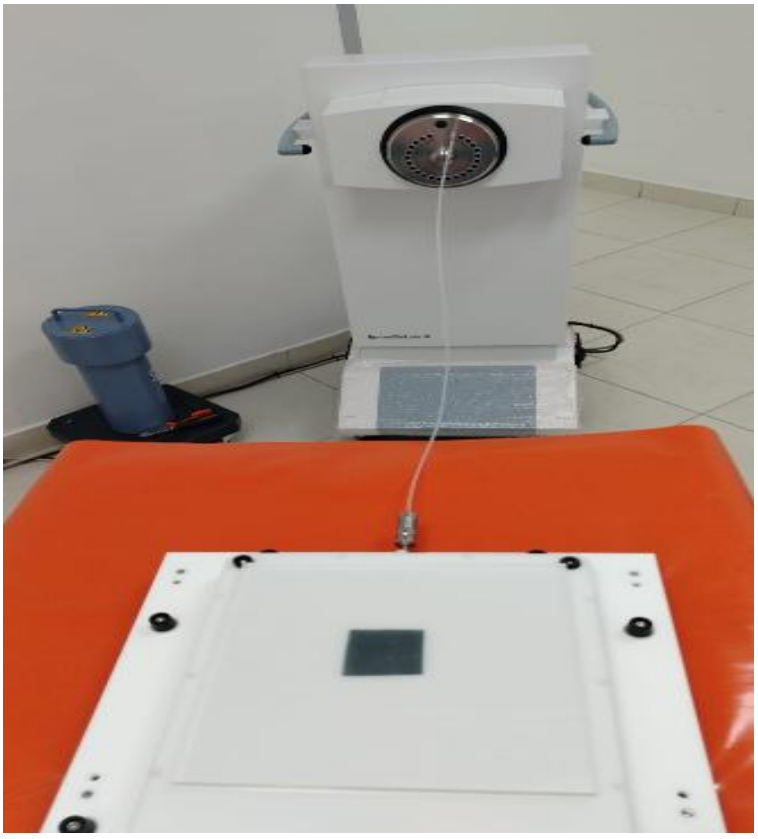


*Figura 16.Setup de medida, clínica ONCORAD sede Trujillo.*

## DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En el presente estudio, se realizó la determinación de la tasa de referencia de Kerma en aire ($K_R$) para una fuente de Ir-192 y la consecuente validación técnica del sistema de planificación BrachyVision. Los resultados obtenidos muestran una concordancia excepcional, con una diferencia porcentual de apenas 0.11% entre el valor medido experimentalmente y el valor teórico calculado por el sistema mediante decaimiento radiactivo. Este nivel de precisión es fundamental, ya que la tasa de kerma es el parámetro de entrada básico que utiliza el algoritmo TG-43 del TPS para calcular la distribución de dosis en el paciente. Al obtener un desvío tan reducido, muy inferior al límite de tolerancia del **±5%** establecido por protocolos internacionales, se confirma que el software BrachyVision está perfectamente sincronizado con la realidad física de la fuente HDR, garantizando la integridad y exactitud de los planes de tratamiento.

Estos hallazgos son consistentes con la investigación de Kim et al. (2016), quienes al comisionar sistemas BrachyVision reportaron incertidumbres en dosis cercanas al 1%**,** estableciendo este margen como un criterio de aceptación estándar para la práctica clínica. En comparación, el desvío de 0.11% alcanzado en esta investigación refleja un control superior de las condiciones experimentales, donde la estabilidad de las lecturas (SD de 0.00%) y la aplicación precisa del factor de corrección por presión y temperatura ($K_{TP}$= 0.988) fueron determinantes para minimizar la incertidumbre. Asimismo, los resultados se alinean con lo expuesto por Vargas (2020), quien en su tesis de la UNMSM indicó concordancias superiores al 98% en la validación de la tasa de kerma, aunque la metodología empleada en este trabajo permitió reducir el margen de error a niveles de laboratorio de referencia.

Por otro lado, al contrastar con los resultados de Orbegozo et al. (2009), quienes hallaron diferencias de entre 1% y 6% utilizando dosimetría con películas radiocrómicas, se evidencia que

el uso de la cámara pozo Standard Imaging HDR1000 Plus proporciona una trazabilidad y repetibilidad mucho más robusta para la verificación de algoritmos. Esta precisión es vital para la seguridad del paciente, tal como sugiere Torres Gutiérrez (2015), puesto que en braquiterapia la dosis se prescribe frecuentemente a distancias muy cortas de la fuente, donde cualquier error mínimo en la caracterización inicial del Kerma se traduce en variaciones significativas de la dosis absorbida por el tumor y los órganos de riesgo. Finalmente, la mínima discrepancia hallada reafirma lo concluido por Castañeda (2018) y Patel et al. (2005) sobre la importancia de las auditorías locales y el uso de instrumentación calibrada para asegurar que el sistema de planificación opere con la máxima fidelidad posible.

# CONCLUSIONES

Se determinó la Tasa de Kerma de Referencia en aire ($K_R$) para la fuente de Ir-192 (Serie 83-001-081325-12667-09), obteniendo un valor medido de 3.5450 cGy $m^2$ $h^{-1}$ frente al valor teórico de 3.5488 cGy $m^2$ $h^{-1}$. La discrepancia porcentual de apenas 0.11% valida la exactitud de la actividad de la fuente y su decaimiento radiactivo (322.62 GBq / 8.72 Ci a la fecha de medición), cumpliendo estrictamente con los criterios de aceptación del protocolo IAEA TECDOC-1151.

Se validó satisfactoriamente el sistema de planificación de tratamiento (TPS) BrachyVision versión 16.X, utilizando el formalismo AAPM TG-43. Las pruebas de dosimetría puntual en un fantoma cúbico de 25 cm mostraron variaciones de dosis de 1.3%, 1.1% y 1.0% en diferentes puntos de cálculo respecto a los valores de referencia. Estos desvíos se encuentran dentro del rango de aceptación del **±2%** establecido para la aceptación de productos de Varian, garantizando la seguridad en la planificación de tratamientos HDR.

El control de calidad del conjunto dosimétrico (Cámara Pozo HDR1000 Plus y Electrómetro CDX 2000B) confirmó un estado operativo óptimo. Se registró una corriente de fuga inexistente (0.000 nC) y una estabilidad de lectura con una desviación estándar del 0.00% para lecturas consecutivas de 76.00 nA, asegurando la trazabilidad y la alta precisión requerida para auditorías PQRT.

Se optimizó el procedimiento de calibración mediante la determinación del punto de máxima respuesta de la cámara de pozo, localizado a una posición de 125.20 cm. La aplicación de factores de corrección críticos, tales como el factor de presión y temperatura ($k_{TP}$= 0.988) y el

factor de recombinación iónica ($k_s$= 1.001), fue fundamental para normalizar las lecturas a condiciones estándar de referencia (22 °C y 1013.25 mbar).

Los controles mecánicos y de seguridad del equipo de braquiterapia de alta tasa de dosis demostraron un desempeño excelente, con una exactitud espacial de 0.00 mm en la posición de la fuente y un cumplimiento total en las pruebas de enclavamiento de puerta, sistema de CCTV, intercomunicador y monitores de radiación. Estas condiciones aseguran un entorno de tratamiento libre de riesgos mecánicos y operativos para el paciente y el personal en la clínica ONCORAD sede Trujillo.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda mantener la periodicidad de la calibración de la fuente de Ir-192 mediante el uso de la cámara pozo HDR1000 Plus, asegurando que el factor de calibración $N_{KR}$ mantenga trazabilidad vigente a estándares internacionales. Esto es crucial dado que la precisión hallada en este estudio (0.11%) depende directamente de la integridad del conjunto dosimétrico.

Es fundamental estandarizar el procedimiento de determinación del punto de máxima respuesta en cada cambio de fuente, tomando como referencia la posición de 125.20 cm establecida en esta investigación. Esto garantiza que las mediciones de corriente (aprox. 76.00 nA) se realicen siempre en la zona de mayor sensibilidad del detector.

Se sugiere formalizar el protocolo de validación del TPS BrachyVision mediante pruebas de dosimetría puntual en fantomas homogéneos, manteniendo como criterio de aceptación el límite de ±2% de variación de dosis. Los desvíos encontrados en este trabajo (entre 1.0% y 1.3%) sirven como línea base para futuras verificaciones del algoritmo TG-43.

Se recomienda implementar un registro histórico de los factores de corrección ambientales ($k_{TP}$), como el valor de 0.988 obtenido en este estudio, para monitorear la estabilidad climática del búnker de braquiterapia y su impacto en la constancia de las lecturas dosimétricas.

Es de vital importancia continuar con la verificación diaria de la exactitud espacial de la fuente (tolerancia de 1 mm), dado que en este estudio se logró una diferencia de 0.00 mm. Cualquier desviación geométrica, por mínima que sea, comprometería la distribución de dosis calculada por el sistema de planificación en distancias cortas.

Se sugiere fortalecer el programa de capacitación continua del personal de la clínica ONCORAD sede Trujillo, enfocándose en la interpretación de las auditorías PQRT (Programa de Garantía de Calidad y Radioprotección) y en la respuesta ante posibles fallos de los sistemas de seguridad y enclavamientos, los cuales demostraron un estado funcional óptimo durante la realización de esta tesis.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar una evaluación expandida de incertidumbres que incluya el factor de cronometraje del equipo y realizar comparaciones inter-laboratorios, con el fin de robustecer la trazabilidad de la tasa de kerma en aire en el norte del país.

## REFERENCIAS


American Association of Physicists in Medicine. (1995). *AAPM TG-43: Dosimetry of interstitial brachytherapy sources*.

Baltas, D., Sakelliou, L., & Zamboglou, N. (2014). *The Physics of Modern Brachytherapy for Oncology*. CRC Press.

Castañeda, J. (2018). *Verificación de la tasa de kerma en aire y control de calidad en equipos de braquiterapia HDR en el norte del Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].

Dale, R., & Jones, B. (2017). *Radiobiological Modelling in Radiation Oncology*. British Institute of Radiology.

Instituto Nacional de Cáncer (INCA). (s.f.). *Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis para Físicos (High-Dose-Rate Brachytherapy Physics Manual)*.

International Atomic Energy Agency. (1996). *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación* (Colección Seguridad Nº 115).

International Atomic Energy Agency. (1999). *IAEA TECDOC-1151: Aspectos físicos de la garantía de calidad en radioterapia: Protocolo de control de calidad*.

International Atomic Energy Agency. (2001). *IAEA TECDOC-1274: Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy*.

Joiner, M., & van der Kogel, A. (2018). *Basic Clinical Radiobiology* (5ta ed.). CRC Press.

Kim, Y., Krigstotter, S., & Pappas, E. (2016). Commissioning and quality assurance of an image-based 3D brachytherapy treatment planning system. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 17(5).

Orbegozo, J., et al. (2009). *Evaluación Dosimétrica para tratamientos usando películas radiocrómicas*. Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN).

Patel, I., et al. (2005). In-air calibration of an HDR Ir-192 brachytherapy source using therapy ion chambers. *Physics in Medicine & Biology*, 50(21).

Pérez, C. A., & Brady, L. W. (2019). *Principles and Practice of Radiation Oncology*. Wolters Kluwer.

Podgorsak, E. B. (2005). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. International Atomic Energy Agency.

Requisitos de Seguridad radiológica en Teleterapia IR.001.01. (s.f.). [Norma Técnica mencionada en tus Conclusiones].

Torres Gutiérrez, F. (2015). *Uso de braquiterapia de alta tasa de dosis con Ir-192 en pacientes con cáncer de cérvix en el Servicio de Radioterapia del Hospital Carlos Alberto Seguin Escobedo ESSALUD-Arequipa, 2012-2014* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María].

Vargas, R. (2020). *Implementación del control de calidad dosimétrico en braquiterapia de alta tasa de dosis con fuente de Ir-192* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

Varian Medical Systems. (2015). *BrachyVision Treatment Planning System Reference Guide*.

# ANEXOS

**ANEXO A**

**INFORMES DE CONTROLES FÍSICOS DIARIOS DEL AFTERLOADER**

GammaMedPlus iX : Informe de controles físicos

jmori / ONCORAD - SEDE TRUJILLO / 641419 / 2025-11-04 09:21:28

QC DIARIO — Fracción 1

**Datos del paciente/tratamiento**

Datos del paciente
Nombre del plan ..... QC DIARIO



Datos del plan
Fracción ..... 1
Nombre de archivo ..... 25u8e17f
Autor del plan ..... jmori
Fecha de entrada en la consola ..... 2025-11-04

Datos del tratamiento
Estado de administración ..... Finalizada
Factor de escala de desintegración ..... 1.72087
Operador ..... jmori
Fecha de tratamiento ..... 2025-11-04
Hora de inicio ..... 09:18:28
Hora de fin ..... 09:21:24

**Comparación planificado/real**

| | Planificada | Administrado |
|---|---|---|
| Actividad de la fuente (Ci) | 10.000 | 5.811 |
| Tiempo total (s) | 80.00 | 137.60 |
| Tiempo total en segundos por actividad en Curie (Ci-s) | 800.00 | 799.59 |

**Detalles del tratamiento**

Canal 1

Longitud del canal (cm) ..... 130.0
Posiciones de parada ..... 2
Tiempo planificado (s) ..... 80.0

Tiempo ajustado (s) ..... 137.6
Tiempo de tratamiento (s) ..... 137.6
Tiempo restante (s) ..... 0.0

| Posición (cm) | 130.0 | 129.0 | 128.0 |
|---|---|---|---|
| Planificada (s) | 0.0 | 40.0 | 40.0 |
| Ajustado (s) | 0.0 | 68.8 | 68.8 |
| Administrado (s) | 0.0 | 68.8 | 68.8 |

**Datos de la fuente**

| Ciclos de cable activo restantes | Días restantes de la fuente | Fecha de calibración | Nº serie del cable |
|---|---|---|---|
| 4970 | 80 | 2025-08-13 12:00:00 | 24-01-3483-001-081325-12667-09 |

Aprobación _____ Fecha 04/11/2025

Lic. Juan José Mori Rojas
FISICO MEDICO - ONCORAD
IPEN/OTAN N° 0504-10

GammaMedPlus iX
Versión de consola 01.02.50 (7317)
Versión del firmware B126

Página 1 de 1

# GammaMedPlus iX : Informe de controles físicos

jmori / ONCORAD - SEDE TRUJILLO / 641419 / 2025-11-05 07:46:52

## QC DIARIO — Fracción 2

### Datos del paciente/tratamiento

**Datos del paciente**

Nombre del plan ..... QC DIARIO

[redacted]

**Datos del plan**

Fracción ..... 2
Nombre de archivo ..... 25u8e17f
Autor del plan ..... jmori
Fecha de entrada en la consola ..... 2025-11-05

**Datos del tratamiento**

Estado de administración ..... Finalizada
Factor de escala de desintegración ..... 1.73702
Operador ..... jmori
Fecha de tratamiento ..... 2025-11-05
Hora de inicio ..... 07:42:21
Hora de fin ..... 07:45:18

### Comparación planificado/real

| | Planificada | Administrado |
|---|---|---|
| Actividad de la fuente (Ci) | 10.000 | 5.757 |
| Tiempo total (s) | 80.00 | 139.00 |
| Tiempo total en segundos por actividad en Curie (Ci-s) | 800.00 | 800.22 |

### Detalles del tratamiento

Canal 1

Longitud del canal (cm) ..... 130.0
Posiciones de parada ..... 2
Tiempo planificado (s) ..... 80.0

Tiempo ajustado (s) ..... 139.0
Tiempo de tratamiento (s) ..... 139.0
Tiempo restante (s) ..... 0.0

| Posición (cm) | 130.0 | 129.0 | 128.0 |
|---|---|---|---|
| Planificada (s) | 0.0 | 40.0 | 40.0 |
| Ajustado (s) | 0.0 | 69.5 | 69.5 |
| Administrado (s) | 0.0 | 69.5 | 69.5 |

### Datos de la fuente

| Ciclos de cable activo restantes | Días restantes de la fuente | Fecha de calibración | N° serie del cable |
|---|---|---|---|
| 4968 | 79 | 2025-08-13 12:00:00 | 24-01-3483-001-081325-12667-09 |

Aprobación _____ Fecha 05/11/2025

Lic. Juan José Mori Rojas
FISICO MEDICO - ONCORAD
IPEN/OTAN N° 0504-10

# GammaMedPlus iX : Informe de controles físicos

rcalvayb / ONCORAD - SEDE TRUJILLO / 641419 / 2025-11-06 07:27:24

## QC DIARIO — Fracción 3

### Datos del paciente/tratamiento

**Datos del paciente**

Nombre del plan ..... QC DIARIO



**Datos del plan**

| | |
|---|---|
| Fracción | 3 |
| Nombre de archivo | 25u8e17f |
| Autor del plan | rcalvayb |
| Fecha de entrada en la consola | 2025-11-06 |

**Datos del tratamiento**

| | |
|---|---|
| Estado de administración | Finalizada |
| Factor de escala de desintegración | 1.75346 |
| Operador | rcalvayb |
| Fecha de tratamiento | 2025-11-06 |
| Hora de inicio | 07:24:18 |
| Hora de fin | 07:27:18 |

### Comparación planificado/real

| | Planificada | Administrado |
|---|---|---|
| Actividad de la fuente (Ci) | 10.000 | 5.703 |
| Tiempo total (s) | 80.00 | 140.20 |
| Tiempo total en segundos por actividad en Curie (Ci-s) | 800.00 | 799.56 |

### Detalles del tratamiento

Canal 1

| | |
|---|---|
| Longitud del canal (cm) | 130.0 |
| Posiciones de parada | 2 |
| Tiempo planificado (s) | 80.0 |
| Tiempo ajustado (s) | 140.2 |
| Tiempo de tratamiento (s) | 140.2 |
| Tiempo restante (s) | 0.0 |

| Posición (cm) | 130.0 | 129.0 | 128.0 |
|---|---|---|---|
| Planificada (s) | 0.0 | 40.0 | 40.0 |
| Ajustado (s) | 0.0 | 70.1 | 70.1 |
| Administrado (s) | 0.0 | 70.1 | 70.1 |

### Datos de la fuente

| Ciclos de cable activo restantes | Días restantes de la fuente | Fecha de calibración | Nº serie del cable |
|---|---|---|---|
| 4965 | 78 | 2025-08-13 12:00:00 | 24-01-3483-001-081325-12667-09 |

Aprobación Físico Renzo Calvay Balcázar Fecha 06-11-2025

# GammaMedPlus iX : Informe de controles físicos

rcalvayb / ONCORAD - SEDE TRUJILLO / 641419 / 2025-11-07 07:50:07

**QC DIARIO** — Fracción 3

## Datos del paciente/tratamiento

### Datos del paciente

Nombre del plan ..... QC DIARIO



### Datos del plan

Fracción ..... 3
Nombre de archivo ..... 25u8e17f
Autor del plan ..... rcalvayb
Fecha de entrada en la consola ..... 2025-11-06

### Datos del tratamiento

Estado de administración ..... Finalizada
Factor de escala de desintegración ..... 1.76991
Operador ..... rcalvayb
Fecha de tratamiento ..... 2025-11-07
Hora de inicio ..... 07:46:41
Hora de fin ..... 07:49:45

## Comparación planificado/real

| | Planificada | Administrado |
|---|---|---|
| Actividad de la fuente (Ci) | 10.000 | 5.650 |
| Tiempo total (s) | 80.00 | 141.60 |
| Tiempo total en segundos por actividad en Curie (Ci-s) | 800.00 | 800.04 |

## Detalles del tratamiento

### Canal 1

Longitud del canal (cm) ..... 130.0
Posiciones de parada ..... 2
Tiempo planificado (s) ..... 80.0

Tiempo ajustado (s) ..... 141.6
Tiempo de tratamiento (s) ..... 141.6
Tiempo restante (s) ..... 0.0

| Posición (cm) | 130.0 | 129.0 | 128.0 |
|---|---|---|---|
| Planificada (s) | 0.0 | 40.0 | 40.0 |
| Ajustado (s) | 0.0 | 70.8 | 70.8 |
| Administrado (s) | 0.0 | 70.8 | 70.8 |

## Datos de la fuente

| Ciclos de cable activo restantes | Días restantes de la fuente | Fecha de calibración | Nº serie del cable |
|---|---|---|---|
| 4961 | 77 | 2025-08-13 12:00:00 | 24-01-3483-001-081325-12667-09 |

Aprobación Físico Renzo Calvay Balcazar Fecha 07-11-2025

# GammaMedPlus iX : Informe de controles físicos

rcalvayb / ONCORAD - SEDE TRUJILLO / 641419 / 2025-11-11 07:12:27

## QC DIARIO — Fracción 3

### Datos del paciente/tratamiento

**Datos del paciente**

Nombre del plan ..... QC DIARIO



**Datos del plan**

Fracción ..... 3
Nombre de archivo ..... 25u8e17f
Autor del plan ..... rcalvayb
Fecha de entrada en la consola ..... 2025-11-06

**Datos del tratamiento**

Estado de administración ..... Finalizada
Factor de escala de desintegración ..... 1.83790
Operador ..... rcalvayb
Fecha de tratamiento ..... 2025-11-11
Hora de inicio ..... 07:09:15
Hora de fin ..... 07:12:22

### Comparación planificado/real

| | Planificada | Administrado |
|---|---|---|
| Actividad de la fuente (Ci) | 10.000 | 5.441 |
| Tiempo total (s) | 80.00 | 147.00 |
| Tiempo total en segundos por actividad en Curie (Ci-s) | 800.00 | 799.83 |

### Detalles del tratamiento

Canal 1

Longitud del canal (cm) ..... 130.0
Posiciones de parada ..... 2
Tiempo planificado (s) ..... 80.0

Tiempo ajustado (s) ..... 147.0
Tiempo de tratamiento (s) ..... 147.0
Tiempo restante (s) ..... 0.0

| Posición (cm) | 130.0 | 129.0 | 128.0 |
|---|---|---|---|
| Planificada (s) | 0.0 | 40.0 | 40.0 |
| Ajustado (s) | 0.0 | 73.5 | 73.5 |
| Administrado (s) | 0.0 | 73.5 | 73.5 |

### Datos de la fuente

| Ciclos de cable activo restantes | Días restantes de la fuente | Fecha de calibración | Nº serie del cable |
|---|---|---|---|
| 4952 | 73 | 2025-08-13 12:00:00 | 24-01-3483-001-081325-12667-09 |

Aprobación _____ Fecha 11/11/2025

**ANEXO B**

## REGISTRO DE MONITOREO RADIOLÓGICO Y PLANO DE INSTALACIÓN

| | | |
|---|---|---|
| ONCORAD Irradiamos bienestar. | **REGISTRO DE MONITOREO RADIOLÓGICO** | AÑO 2025 |
| | | FECHA: 24-11-2025 |

### AREA DE BRAQUITERAPIA DE ALTA TASA DE DOSIS

| | |
|---|---|
| ENTIDAD | ONCORAD |
| DIRECCIÓN LEGAL | Av. José Leonardo Ortiz N$^0$ 423 |
| DISTRITO / PROVINCIA / REGIÓN | Chiclayo / Chiclayo / Lambayeque |

### I. DATOS DE LA INSTALACIÓN

| | |
|---|---|
| DIRECCIÓN | Panamericana Norte Km 558 |
| DISTRITO / PROVINCIA / REGIÓN | Trujillo / Trujillo / La Libertad |

### II. UNIDAD DE TRATAMIENTO

| MODELO | MARCA | SERIE | FUENTE | APLICACIÓN |
|---|---|---|---|---|
| GammaMed Plus iX | VARIAN | 1419 | Ir-192 | Oncológica |

### III. INSTRUMENTACIÓN

| EQUIPO | MARCA | MODELO | SERIE | FECHA CAL. |
|---|---|---|---|---|
| Monitor de radiación | SE Int. | Ranger | R319288 | 07/01/2024 |

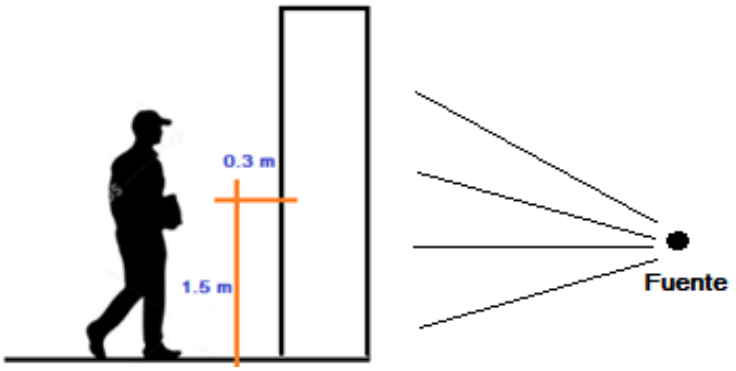
### IV. CARGA LABORAL

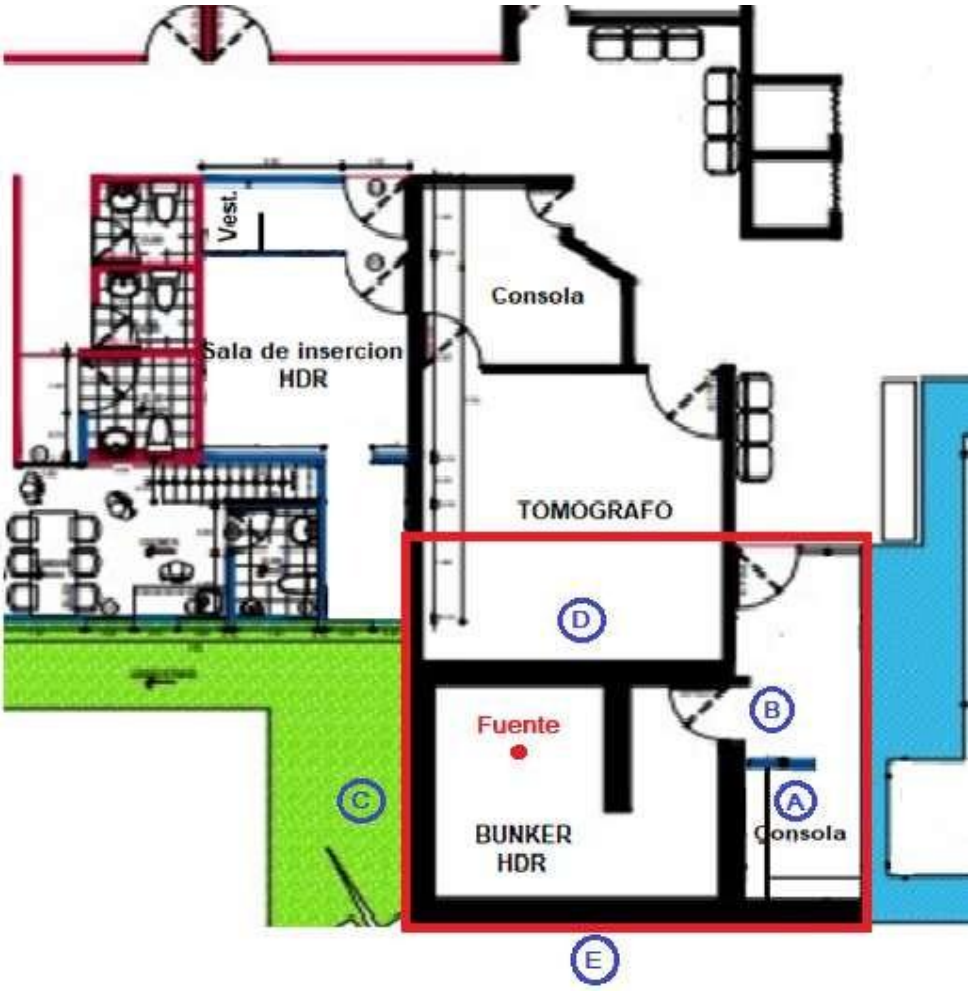
| FUENTE | FRECUENCIA | HORAS/DIA | Nº PACIENTES |
|---|---|---|---|
| Ir-192 | Lunes - Viernes | 6 | 30 |

### V. CONDICIONES DE MONITOREO

| EQUIPO | DISTANCIA DE EVALUACIÓN | | MEDIO DISPERSOR |
|---|---|---|---|
| | PARED (m) | SUELO (m) | |
| Monitor de radiación | **0.30** | **1.5** | Agua |

## VI. PLANO DE LA INSTALACION Y UBICACIÓN DE LA FUENTE




El área verde, considerada como libre se encuentra rodeada por un cerco perimétrico a 2m de separación de la pared del bunker.

## VII. ESTIMACIÓN DE LA DOSIS

| PARED | DESCRIPCION | TD (µSv/h) | TDS (mSv) | TDA (mSv) |
|---|---|---|---|---|
| **A** | Consola de tratamiento | 1.28 | 0.0384 | 1.920 |
| **B** | Puerta de acceso al bunker | 1.20 | 0.0360 | 1.800 |
| **C** | Área libre | 0.85 | 0.0255 | 1.275 |
| **D** | Bunker de tomografía | 0.60 | 0.0180 | 0.900 |
| **E** | Área libre | 0.75 | 0.0225 | 1.125 |
| **F** | Techo (Acceso restringido) | 0.4 | 0.0120 | 0.600 |

**TD:** Tasa de dosis (µSv/h)

**TDS:** Tasa de dosis semanal (µSv); para fines de estimar la dosis semanal se considera un turno laboral diario de 6h y una frecuencia semanal de 5 días, sin embargo, esta valoración esta sobreestimada dado que el tiempo promedio de exposición por pacientes es de 15 min, con 30 pacientes a la semana el tiempo total neto de exposición es de 450 min o 7.5 h, que representa la cuarta parte del total de horas evaluadas.

$$TDS = TD \times 30$$

TDA: Tasa de dosis anual (µSv); para estimar este parámetro se considera 50 sem/año, por lo que la dosis anual se determinará de la siguiente manera.

$$TDA = TDS \times 50$$

## VIII. OBSERVACIÓN

En el ítem VI sobre el plano de la instalación, el área que se encuentra enmarcada dentro del cuadro rojo, representa un área restringida de acceso solo para el personal involucrado. Adicionalmente durante la irradiación del paciente en consola solo se encuentra personal de física médica, vigilando y monitoreando al paciente; el resto del personal como médico, enfermera y otros su permanencia es temporal para labores de evaluación y aprobación del plan y/o retiro del dispositivo una vez finalizado el tratamiento.

## IX. REFERENCIA

- Requisitos de Seguridad radiológica en Teleterapia IR.001.01
- Normas Básicas BSS, Publicación 115-OIEA.

## X. CONCLUSIONES

En base a las lecturas de dosis obtenidas la instalación cumple con lo establecido en la Norma Técnica Requisitos de Seguridad radiológica en Teleterapia IR.001.01 y en los protocolos internacionales.

| Realizado por: | Revisado por: |
|---|---|
| Lic. Renzo Daniel Calvay Balcázar<br>CFP - 0943 | Lic. Juan Mori Rojas<br>Fisico Medico en Braquiterapia<br>IPEN/OTAN N° 0594-10 |

**ANEXO C**

## CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DEL CONJUNTO DOSIMÉTRICO

**Report No. HDR11920**

University of Wisconsin - Madison
Department of Medical Physics
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

*This calibration laboratory is accredited by the AAPM and the A2LA to the ISO/IEC 17025:2017 standard.*

ACCREDITED

Room B1002 WIMR, 1111 Highland Ave., Madison, WI 53705
Phone: (608) 262-6320

### Report of Calibration for
### HDR Well-Type Ionization Chamber

**Submitted by:** Standard Imaging
3120 Deming Way
Middleton WI 53562-1461 USA

**Well Chamber:** Standard Imaging
Model: HDR1000 Plus
S/N: A232372

Date Received: 12/SEP/2023 Calibration Completed: 15/SEP/2023

This calibration is directly traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST). The expanded uncertainty of measurement as stated in the data page of this report is the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. This report shall not be reproduced except in full, without the written permission of the UWRCL. The following results relate only to the equipment calibrated and reported.

**Report No. HDR11920**

University of Wisconsin - Madison
Department of Medical Physics
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

## Ir-192 High Dose Rate Brachytherapy Measurement Data

Calibration Completed: 15/SEP/2023

Report Date: 15/SEP/2023

**Re-Entrant Chamber**

Standard Imaging
Model: HDR1000 Plus
S/N: A232372

**Electrometer used in Calibration**

Standard Imaging, Inc.
Model: MAX-4000
S/N: E010242

| | | |
|---|---|---|
| Type | : | Well-type |
| Atmospheric Communication | : | Open |
| Calibration Source | : | Varian GammaMed iX HDR Unit, source mfr: Alpha-Omega |

*For detailed source parameters, please refer to the Joint AAPM/IROC Registry at: rpc.mdanderson.org.*

| | | |
|---|---|---|
| Source Strength | : | 27.54 mGy·m²/h |
| Source Holder Used | : | HDR Ir-192 source holder |
| Source Reference Point | : | 52.0 mm from bottom of chamber insert |
| Collecting Electrode Bias | : | +300 V |
| Charge Collected | : | Negative |
| Pre-Irradiation Leakage | : | $-2.0 \times 10^{-15}$ A |
| Calibration Uncertainty | : | 2.8 % |
| Ion Collection Efficiency (Aion) | : | 0.999 |

**Calibration Coefficient (at 22 °C and 101.325 kPa)**

Air Kerma Strength Calibration Coefficient: **$4.721 \times 10^{5}$** Gy·m²/h/A

Environmental Conditions: T=21.6 °C, P=98.86 kPa, RH=45%. Calibration Protocol: E.5.3

Wendy S. Kennan

Calibrated by:
Wendy S. Kennan, B.A.
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

Reviewed by:
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory
Advisory Committee Member or Designee

**Report No. EDM42736**

University of Wisconsin - Madison
Department of Medical Physics
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

Accredited® Dosimetry Calibration Laboratory

*This calibration laboratory is accredited by the AAPM and the A2LA to the ISO/IEC 17025:2017 standard.*

ACCREDITED CALIBRATION CERT #1664.01

Room B1002 WIMR, 1111 Highland Ave., Madison, WI 53705
Phone: (608) 262-6320

# Report of Calibration for Electrometer

**Submitted by:** Standard Imaging
3120 Deming Way
Middleton WI 53562-1461 USA

**Electrometer:** Standard Imaging
Model: CDX-2000B
S/N: B232222

Date Received: 12/SEP/2023 Calibration Completed: 13/SEP/2023

This calibration is directly traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST). The expanded uncertainty of measurement as stated in the data page of this report is the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. This report shall not be reproduced except in full, without the written permission of the UWRCL. The following results relate only to the equipment calibrated and reported.

**Report No. EDM42736**

University of Wisconsin - Madison
Department of Medical Physics
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

## Electrometer Measurement Data

Calibration Completed: 13/SEP/2023

Report Date: 13/SEP/2023

**Electrometer**

Standard Imaging
Model: CDX-2000B
S/N: B232222

**Electrometer Settings**

**HV Bias** (Guard voltage with respect to connector outer shell)

+150V : +150.4 V  -150V : -150.4 V
+300V : +300.6 V  -300V : -300.5 V

## Charge Calibration Coefficients

| Scale | Zero-Drift | Leakage | Range | Linearity | Calibration Coefficient | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Charge** | | | 5 to 10,000 nC | +/- 0.03% | **0.999** | **nC/Rdg** |

Calibration Uncertainty: 0.21 %. Refer to the appendix for a description of reported calibration coefficients.
Environmental Conditions: T=22.8 °C, P=98.91 kPa, RH=44%. Calibration Protocol: E.4.2

Calibrated by:
Jennifer L. Hull, B.S.
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

Reviewed by:
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory
Advisory Committee Member or Designee

**Report No. EDM42736**

University of Wisconsin - Madison
Department of Medical Physics
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

## Electrometer Measurement Data

Calibration Completed: 13/SEP/2023

Report Date: 13/SEP/2023

**Electrometer**

Standard Imaging
Model: CDX-2000B
S/N: B232222

**Electrometer Settings**

**HV Bias** (Guard voltage with respect to connector outer shell)

+150V : +150.4 V -150V : -150.4 V
+300V : +300.6 V -300V : -300.5 V

## Ampere Calibration Coefficients

| Scale | Range | Linearity | Calibration Coefficient | |
|---|---|---|---|---|
| **Rate** | 0.5 to 490 nA | +/- 0.02% | **0.999** | **nA/Rdg** |

Calibration Uncertainty: 0.21 %. Refer to the appendix for a description of reported calibration coefficients.
Environmental Conditions: T=22.8 °C, P=98.91 kPa, RH=44%. Calibration Protocol: E.4.3

Calibrated by:
Jennifer L. Hull, B.S.
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory

Reviewed by:
Accredited Dosimetry Calibration Laboratory
Advisory Committee Member or Designee

**ANEXO D**

**CERTIFICACIÓN DE LA FUENTE RADIACTIVA Y PROTOCOLOS DE EMERGENCIA**

AOS
Alpha Omega Services, Inc.

Varian Medical Systems Brachytherapy

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ir-192: | 12.667 | Ci ( | 468.673 | GBq) |
| Act. On: | 13-Aug-25 Dim.: | | 0.9 | mm |
| Source no: | 24-01-3483-001-081325-12667-09 | | | |
| Air Kerma Rate at 1m: | | | 51.554 | mGy/h |

MSR: 25-2563 Rev A

## MEDICAL SOURCE CERTIFICATE



| | |
|---|---|
| Customer Name | GLOBAL HEALTHCARE SOLUTION PE |
| Machine Number | H641419-GM |
| Source serial number | 24-01-3818-001-021226-12563-83 |
| AOS Work Order Number | A-01115442 |
| Source Type | GM12000680 |
| Model | GammaMed 232 |
| Connector serial number | 24-001-3818 |
| Container serial number | 1377 |
| Source code | Medical source GM+HDR GM12000680 |
| Material | AISI 316L |
| ISO Code | ISO/12/C63211 |
| Certificate number for special form | USA/0723/S (Revision 5) |
| Isotope | Iridium-192 |
| Physical form | Solid |
| Chemical form | Metal |
| Active dimensions (Diam x h) mm | 0.6 mm x 3.5 mm |
| Capsule dimensions | 0.9mm x 4.57mm |
| Encapsulation | Single |
| Apparent activity | 464.84GBq (12.56Ci ) |
| Air kerma rate at 1 m | 51.132 mGy/h +/- 5% |
| Calibration date @ 12:00 noon Central Time Zone-USA (**) | 12-Feb-2026 |
| Welding | laser |
| 10 Ci Date | 09-Mar-2026 |

**Tests**

| | | |
|---|---|---|
| Total length | | ACCEPTED |
| Diameter | | ACCEPTED |
| Laser weld visual check | | ACCEPTED |
| Capsule integrity (15N) | | ACCEPTED |
| Cables-connector assembly integrity (40N) | | ACCEPTED |
| Free of surface contamination (*) | | ACCEPTED |
| Leakage test (*) | 13-Feb-2026 | < 5 nCi |

(*) the surface contamination is detected by the wet wipe test according to the ISO norm 9978 (2020) (5.3.1)

We certify that the source is in compliance with the following norms : NF ISO 9978 (2020), ISO 2919 (2012)

(**) Calibration time is based on the observance of Standard or Daylight Savings time as of the transition dates formally recognized in the USA.

Date : 03/06/2025

Responsible for quality control

Signature :

FM0476 Rev. D

Name : Cory Fontenot, Quality Control

varian

# GAMMAMED*PLUS* IX

## PROCEDIMIENTOS DE RESPUESTA DE EMERGENCIA

***(para colocar avisos)***

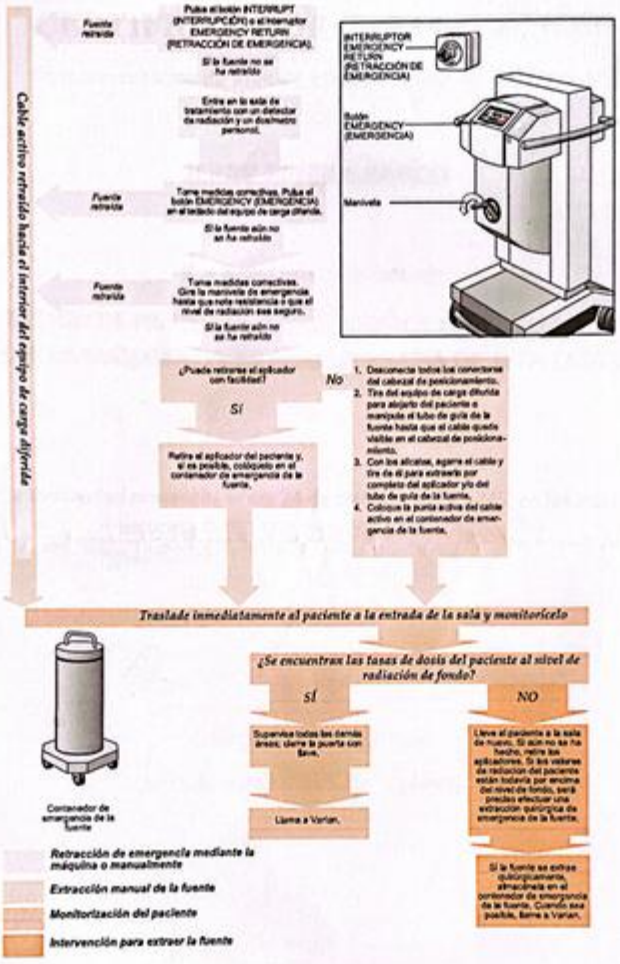
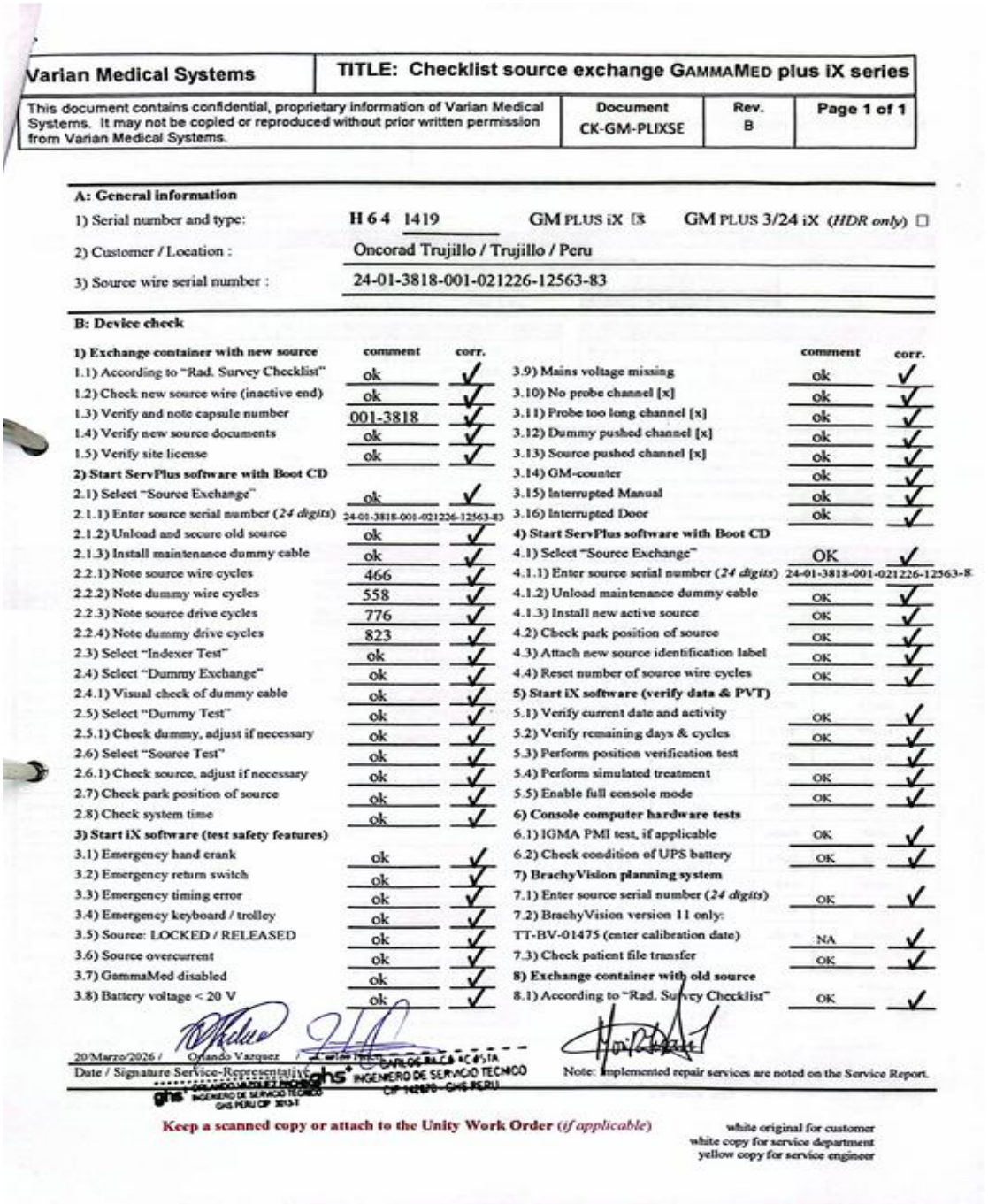



Figura 1 Procedimientos de respuesta de emergencia


**Fabricante legal:**
**Varian Medical Systems, Inc.**
**3100 Hansen Way**
**Palo Alto, CA 94304**
**USA**

**ANEXO E**

**REGISTROS DE COMISIONAMIENTO Y VALIDACIÓN TRAS EL RECAMBIO DE FUENTE RADIACTIVA**



| Varian Medical Systems | TITLE: Checklist source exchange GAMMAMED plus iX series | | |
|---|---|---|---|
| This document contains confidential, proprietary information of Varian Medical Systems. It may not be copied or reproduced without prior written permission from Varian Medical Systems. | Document CK-GM-PLIXSE | Rev. B | Page 1 of 1 |

**A: General information**

1) Serial number and type: H 6 4 1419 GM PLUS iX ☒ GM PLUS 3/24 iX (*HDR only*) ☐

2) Customer / Location : Oncorad Trujillo / Trujillo / Peru

3) Source wire serial number : 24-01-3818-001-021226-12563-83

**B: Device check**

| | comment | corr. |
|---|---|---|
| **1) Exchange container with new source** | | |
| 1.1) According to "Rad. Survey Checklist" | ok | ✓ |
| 1.2) Check new source wire (inactive end) | ok | ✓ |
| 1.3) Verify and note capsule number | 001-3818 | ✓ |
| 1.4) Verify new source documents | ok | ✓ |
| 1.5) Verify site license | ok | ✓ |
| **2) Start ServPlus software with Boot CD** | | |
| 2.1) Select "Source Exchange" | ok | ✓ |
| 2.1.1) Enter source serial number (*24 digits*) | 24-01-3818-001-021226-12563-83 | |
| 2.1.2) Unload and secure old source | ok | ✓ |
| 2.1.3) Install maintenance dummy cable | ok | ✓ |
| 2.2.1) Note source wire cycles | 466 | ✓ |
| 2.2.2) Note dummy wire cycles | 558 | ✓ |
| 2.2.3) Note source drive cycles | 776 | ✓ |
| 2.2.4) Note dummy drive cycles | 823 | ✓ |
| 2.3) Select "Indexer Test" | ok | ✓ |
| 2.4) Select "Dummy Exchange" | ok | ✓ |
| 2.4.1) Visual check of dummy cable | ok | ✓ |
| 2.5) Select "Dummy Test" | ok | ✓ |
| 2.5.1) Check dummy, adjust if necessary | ok | ✓ |
| 2.6) Select "Source Test" | ok | ✓ |
| 2.6.1) Check source, adjust if necessary | ok | ✓ |
| 2.7) Check park position of source | ok | ✓ |
| 2.8) Check system time | ok | ✓ |
| **3) Start iX software (test safety features)** | | |
| 3.1) Emergency hand crank | ok | ✓ |
| 3.2) Emergency return switch | ok | ✓ |
| 3.3) Emergency timing error | ok | ✓ |
| 3.4) Emergency keyboard / trolley | ok | ✓ |
| 3.5) Source: LOCKED / RELEASED | ok | ✓ |
| 3.6) Source overcurrent | ok | ✓ |
| 3.7) GammaMed disabled | ok | ✓ |
| 3.8) Battery voltage < 20 V | ok | ✓ |

| | comment | corr. |
|---|---|---|
| 3.9) Mains voltage missing | ok | ✓ |
| 3.10) No probe channel [x] | ok | ✓ |
| 3.11) Probe too long channel [x] | ok | ✓ |
| 3.12) Dummy pushed channel [x] | ok | ✓ |
| 3.13) Source pushed channel [x] | ok | ✓ |
| 3.14) GM-counter | ok | ✓ |
| 3.15) Interrupted Manual | ok | ✓ |
| 3.16) Interrupted Door | ok | ✓ |
| **4) Start ServPlus software with Boot CD** | | |
| 4.1) Select "Source Exchange" | OK | ✓ |
| 4.1.1) Enter source serial number (*24 digits*) | 24-01-3818-001-021226-12563-8 | |
| 4.1.2) Unload maintenance dummy cable | OK | ✓ |
| 4.1.3) Install new active source | OK | ✓ |
| 4.2) Check park position of source | OK | ✓ |
| 4.3) Attach new source identification label | OK | ✓ |
| 4.4) Reset number of source wire cycles | OK | ✓ |
| **5) Start iX software (verify data & PVT)** | | |
| 5.1) Verify current date and activity | OK | ✓ |
| 5.2) Verify remaining days & cycles | OK | ✓ |
| 5.3) Perform position verification test | | ✓ |
| 5.4) Perform simulated treatment | OK | ✓ |
| 5.5) Enable full console mode | OK | ✓ |
| **6) Console computer hardware tests** | | |
| 6.1) IGMA PMI test, if applicable | OK | ✓ |
| 6.2) Check condition of UPS battery | OK | ✓ |
| **7) BrachyVision planning system** | | |
| 7.1) Enter source serial number (*24 digits*) | OK | ✓ |
| 7.2) BrachyVision version 11 only: TT-BV-01475 (enter calibration date) | NA | ✓ |
| 7.3) Check patient file transfer | OK | ✓ |
| **8) Exchange container with old source** | | |
| 8.1) According to "Rad. Survey Checklist" | OK | ✓ |

20/Marzo/2026 / Orlando Vazquez / Carlos Rubio

Date / Signature Service-Representative

ghs ORLANDO VAZQUEZ PACHECO INGENIERO DE SERVICIO TECNICO GHS PERU CIP 3013-T

ghs CARLOS RUBIO ACOSTA INGENIERO DE SERVICIO TECNICO CIP 142870 - GHS PERU

Note: Implemented repair services are noted on the Service Report.

**Keep a scanned copy or attach to the Unity Work Order** (*if applicable*)

white original for customer
white copy for service department
yellow copy for service engineer

varian

# GammaMed Radiation Survey Checklist

This document contains confidential, proprietary information of Varian Medical Systems. It may not be copied or reproduced without prior written permission from Varian Medical Systems.

| Hospital/Clinic | Afterloader Serial Number | Date |
|---|---|---|
| Oncorad Trujillo | H641419 | 03/20/2025 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Old Source S/N: | 24-01-3483-001-081325-12667-09 | Return Container S/N | 1377 |
| New Source S/N | 24-01-3818-001-021226-12563-83 | Container on Site S/N | 931 |

| Radiation Meter | Dose Rate Meter | Contamination Meter |
|---|---|---|
| Make/Model Number: | LUDLUM /26-1 | LUDLUM /26-1 |
| Serial No: | PF020838 | PF020838 |
| Calibration Expiry Date: | 29-11-2026 | 29-11-2026 |

| Independent Room Monitor | |
|---|---|
| Available y/n: | y |
| Make/Model: | NUVIA/ALMO (0996) |
| Functional y/n: | Y |

*If the measured dose-rate or the wipe test result is exceeding the maximum value as specified:*

- *Lock the wire in the Shipping Container.*
- *Lock the Treatment Room Door.*
- *Contact your manager, your RSO and VBT GCS.*
- *Contact the customer RSO.*

*When measuring count rates from contamination wipes: (CPS – Counts Per Second):*

- *Only use the wipes recommended in FRU-List on GCS Data-Center (https://gcs.gecs.varian.com), no exceptions allowed, as most hospital provided alcoholic fluids contain adverse ingredients.*
- *Measure wipes in console area to prevent counts from sources added to the contamination detection.*
- *For stable count rates integrate over at least 60 seconds (meter function is also called Scaler or Timer).*
- *For wipes and counts, measure 1cm above surface (avoid contamination).*
- *If elevated counts do not return to Background after removing the meter from the sample, the meter could be contaminated. Contact your RSO.*

*Transport Index (T.I.) = Maximum radiation dose rate (µSv/h) measured at 1 meter from package surface, divided by 10 (no unit).*

| Test Description | Value | Maximum | Units | Measure Point |
|---|---|---|---|---|
| Background count - *integrate 60 seconds (in console area – remote from sources – reference for contamination wipes – use integrating function of meter)* | 0.3 | N/A | CPS | N/A |
| Background dose rate - *wait 60 seconds for stable readings (in console area – remote from sources – reference for surveys and dose rate readings)* | 0.17 | N/A | µSv/h | N/A |
| Survey tools & toolbox *(in console area – scan by slowly hovering meter 1cm above surface of toolbox)* | 0.3 | 2 x Background | CPS | <1cm |
| Survey Afterloader – *Old Source (survey all surfaces - measure points as listed below for New Sources, 5 cm from surface – record maximum reading only)* | 3.05 | 100 | µSv/h | 5 cm |
| Survey Shipping Container – *New Source (top, sides, bottom)* | 99.9 | 2000 | µSv/h | Surface |
| Wipe Shipping Container – *New Source (wipe step by step – surfaces of closed blue overpack bucket, inside surfaces closed lid, under lid and safe connector – record maximum reading only)* | 0.44 | 2 x Background | CPS | <1cm |
| Wipe Tail of Wire – *New Source (after uncoiling from inside container) Evaluate results (container/wire) before loading wire into the Afterloader.* | 0.50 | 2 x Background | CPS | <1cm |
| Wipe Tail of Wire – *Old Source (after unloading to container)* | 0.46 | 2 x Background | CPS | <1cm |
| Survey Afterloader – *New Source (Indexer, in front of channel 12/13, 5cm from surface* | 8.07 | 100 | µSv/h | 5cm |
| Survey Afterloader – *New Source (top, 5cm from surface)* | 12.15 | 100 | µSv/h | 5cm |
| Survey Afterloader – *New Source (sides, 5cm from surface)* | 3.00 | 100 | µSv/h | 5cm |
| Survey Afterloader – *New Source (back, 5cm from surface)* | 18.5 | 100 | µSv/h | 5cm |
| Survey Afterloader – *New Source (front, 5cm from surface)* | 0.40 | 100 | µSv/h | 5cm |
| Wipe Shipping Container – *Old Source (wipe step by step – surfaces of closed blue overpack bucket, inside surfaces closed lid, under lid and safe connector – record maximum reading only)* | NA | 2 x Background | CPS | <1cm |
| Survey Shipping Container – *Old Source (top, sides, bottom)* | 18,73 | 500 | µSv/h | Surface |
| Shipping Container TI - *Old Source (see NOTE - record maximum reading only)* | 0.1 | 1 for II-Yellow 10 for III-Yellow | N/A | 1m from package surface |
| Survey all tools, toolbox and waste - *(in console area - scan by slowly hovering meter 1cm above surface of toolbox and plastic bag with waste)* | 0.4 | 2 x Background | CPS | <1cm |

| Source Activity on Day of Installation (Select Unit Ci / GBq) | | 8.960 / 331.52 (Ci / GBq) |
|---|---|---|
| Service Engineer: | Name: Orlando Vazquez / Carlos Paico | Signature: |

Keep a scanned copy or attach to the Unity Work Order, if applicable.

Printed copies must be verified for correctness against the approved document in the

ghs ORLANDO VAZQUEZ INGENIERO DE SERVICIO TECNICO GHS PERU CIP 301317

CARLOS PAICO ACOSTA INGENIERO DE SERVICIO TECNICO CIP 142573 - GHS PERU

CK-GM-RADIATION-H

# GammaMed Plus (iX) Cableship Checklist

| Serial Number | Institution | Service Representative | Date | FSR No. |
|---|---|---|---|---|
| H64 1419 | Oncorad Trujillo | Orlando Vazquez | 20/03/2026 | SA-28541 |

The person preparing the radioactive material for shipment must hold a valid "GammaMed Plus (iX) service training certificate" and, if shipping by air, a valid "IATA Dangerous Goods - Radioactive Materials" training certificate.

Complete documents and labels with reference to the BRAVOS and GammaMed Plus (iX) Cableship Service Manual (SVM-GE-CABLESHIP)

| Inspect Shipping Container Prior to Unloading Old Source Cable | | | |
|---|---|---|---|
| No damage on metal container, lid and handle? | ✓ | No damage on overpack (blue bucket) and handles? | ✓ |
| Foam inserts present and intact? | ✓ | Return paperwork available? | ✓ |

| Radiation Survey and Wipe Test with Returning Source - If values exceeded, follow orders on CK-GM-Radiation | | | |
|---|---|---|---|
| <= 500 µSv/h on any container surface? | ✓ | <= 10 µSv/h at one meter (1m) from any container surface? | ✓ |
| Contamination wipe does not exceed 2 x 'Background' levels recorded on CK-GM-Radiation? | ✓ | Transport Index (TI recorded on CK-GM-Radiation) Enter on IATA DGR Class 7 Hazard Label (Sec.: 10.7.3.1) | ✓ |

| Labeling / Documenting the Return Shipment | |
|---|---|
| Locations A *Type A Shipping Container (metal inner container) and Overpack (blue plastic bucket)*<br>Place on 2 opposite sides the filled DOT/IATA Class 7 Hazard Label | ✓ |
| Location B *Document pouch on lid of Overpack*<br>Place 4 completely filled in copies of the Shippers Declaration for Dangerous Goods<br>Place 2 IAEA Special Form Certificates<br>Place 2 filled in Return Invoices<br>Place 1 copy of the TSCA Non-Certification for returns to AOS<br>Place 2 CMR/ADR Documents, where applicable | ✓ |
| Locations C *Type A Shipping Container and Overpack*<br>Place filled in Shipper's and Consignee Address Label - replace old label by Return Address Label | ✓ |
| Location D *Type A Shipping Container and Overpack*<br>Attach the new UN3332-PSN Label ("RQ" removed if applicable) - replace the existing UN3332-PSN Label | ✓ |
| Location E *Overpack only* place "OVERPACK" Label on Overpack | ✓ |

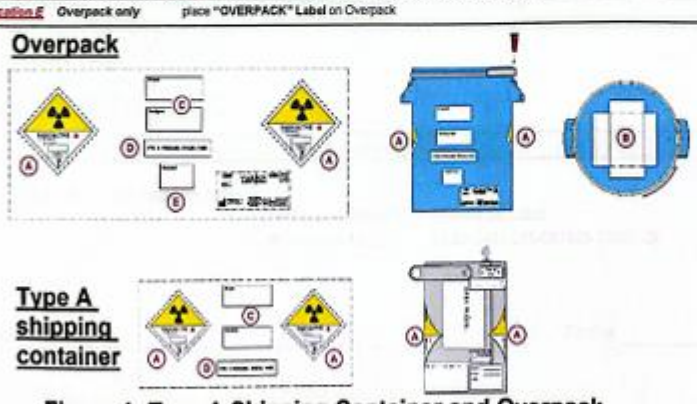



**Figure 1: Type A Shipping Container and Overpack**

| Finalize | |
|---|---|
| Place keylocked Type A Shipping Container inside Overpack | ✓ |
| Close and seal Overpack with tamper seal. | ✓ |
| Is Varian handing over container directly to Carrier? If no: Hand over transport documents and container to responsible hospital staff, y/n | ✓ |
| As applicable - Notify Customer and Carrier for collection details | ✓ |

Attach a scanned copy to the Unity workorder and keep the original for records

ghs ORLANDO VAZQUEZ PROHIBIDO INGENIERO DE SERVICIO TECNICO GHS PERU CIP 3013-T

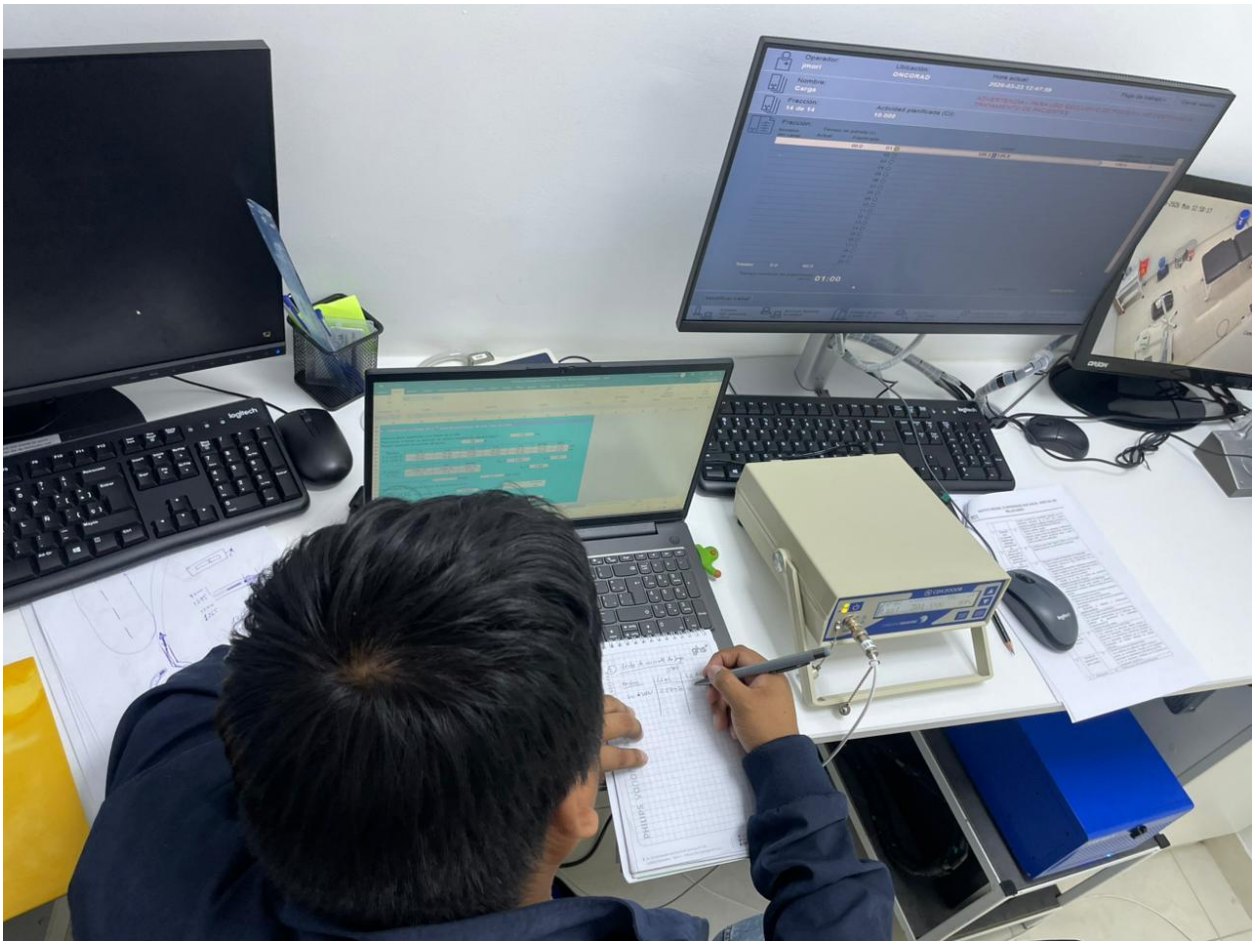
Printed copies must be verified for correctness against the approved document in the Document Management System.




Scanned with CamScanner

**ANEXO F**

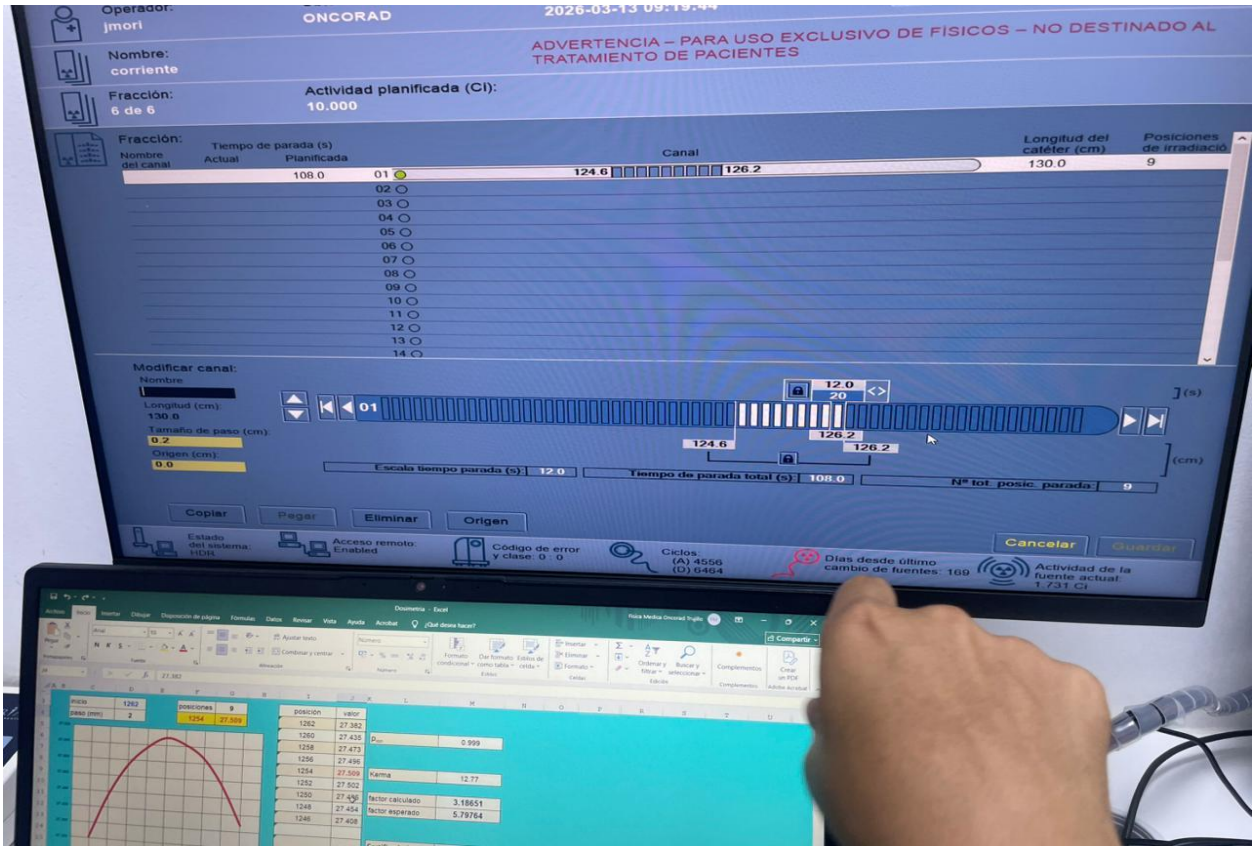
**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA FASE EXPERIMENTAL**






13-02-2026 Fri 13:38:30
Camera 02
13-02-2026 Fri 13:38:30
ORION
INPUT
REDIAL
FLASH
PAUSE
MUTE
1
2 ABC
3 DEF
4 GHI
5 JKL
6 MNO


Ubicación:
ONCORAD
Nombre:
Carga
Fracción:
8 de 8
Actividad planificada (CI):
10.000
Hora actual:
2026-03-23 11:51:05
ADVERTENCIA – PARA USO EXCLUSIVO DE FÍSICOS – NO DESTINADO AL TRATAMIENTO DE PACIENTES
Flujo de trabajo
Cerrar sesión
Fracción:
Nombre del canal
Tiempo de parada (s) Actual Planificada
300.0
Canal
Longitud del catéter (cm)
Posiciones de irradiación
130.0
Modificar canal:
Longitud (cm):
Tamaño de paso (cm):
Escala tiempo parada (s): 300.0
Tiempo de parada total (s): 300.0
Nº tot. posic. parada: 1
Copiar
Pegar
Eliminar
Origen
Cancelar
Guardar
Estado del sistema: HDR
Acceso remoto: Enabled
Código de error y clase: 0 : 0
Ciclos: (A) 4996 (D) 6421
Días desde último cambio de fuentes: 3
Actividad de la fuente actual: 8.711 Ci


Operador:
jmori
ONCORAD
2026-03-13 09:19:44
ADVERTENCIA – PARA USO EXCLUSIVO DE FÍSICOS – NO DESTINADO AL TRATAMIENTO DE PACIENTES
Nombre:
corriente
Fracción:
6 de 6
Actividad planificada (CI):
10.000
Fracción:
Nombre del canal
Tiempo de parada (s) Actual Planificada
108.0
Canal
124.6
126.2
Longitud del catéter (cm)
130.0
Posiciones de irradiación
9
Modificar canal:
Nombre:
Longitud (cm):
130.0
Tamaño de paso (cm):
0.2
Origen (cm):
0.0
12.0
20
126.2
124.6
126.2
Escala tiempo parada (s): 12.0
Tiempo de parada total (s): 108.0
Nº tot. posic. parada: 9
Copiar
Pegar
Eliminar
Origen
Cancelar
Guardar
Estado del sistema: HDR
Acceso remoto: Enabled
Código de error y clase: 0 : 0
Ciclos: (A) 4556 (D) 6464
Días desde último cambio de fuentes: 169
Actividad de la fuente actual: 1.731 Ci
Dosimetría - Excel
Física Médica Oncorad Trujillo
Factor calculado 3.18651
Factor esperado 5.79764


ÁREA CONTROLADA
PROHIBIDO INGRESAR
SIN AUTORIZACIÓN
GAMMAMED PLUS iX
MARCA
SERIE
ISOTOPO
Varian
1419
Ir-192
ONCORAD


varian
Modificar canal:
Nombre
Longitud (cm):
130.0
Tamaño de paso (cm):
0.2
Origen (cm):
0.0
Copiar
Estado del sistema:
HDR
CDX2000B
STANDARD IMAGING
Press MODE to bypass
07:52 min
MODE ZERO
START RESET
Lenovo


PLUS


ALMO
Alarm 1: 10,0µSv/h
18550 CE
1,17 µSv/h
17:15:01
Menu


X30
VARIAN
medical systems
FUENTE
FUERA
ALMACENADA
ASEGURADA
TRATAMIENTO
INICIAR
EN CURSO
TERMINADO
INTER-
RUPCIÓN
INTERRUMPIDO
MODO
NORMAL
ESPECIAL
ALARMA
REINICIO
PUERTA
DOSIS
APAGAR
AUDIO
APAGAR AUDIO
ALIMENTACIÓN
SECTOR
BATERÍA
CONSOLA DE CONTROL

