



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
Escuela de Tecnología Médica

TESIS PROFESIONAL

Para optar al título profesional de Tecnólogo Médico con mención Imagenología, Radioterapia y Física Médica.

“Revisión retrospectiva de los registros de dosimetría personal del Departamento de Dosimetría de la Comisión Chilena de Energía Nuclear en el periodo 2000-2021”

Gabriel Rius Zúñiga - Matias Silva San Juan

Tutores:

María José Yáñez Aguilera

Comisión Chilena de Energía Nuclear

Marianela Hervías Jara

Departamento de Tecnología Médica

Ricardo Videla Valdebenito

Comisión Chilena de Energía Nuclear

Asesor Estadístico:

TM MSc Denisse Karl Sáez

Fecha: 30 de Noviembre 2022

ACTA CURSO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El Sr. **Gabriel Alberto Rius Zúñiga**, estudiante de Tecnología Médica con Mención Imagenología, Radioterapia y Física Médica, cumpliendo con los requisitos establecidos en el plan de estudio, realizó durante el noveno semestre de la carrera, la Tesis Profesional titulada: **"Revisión retrospectiva de los registros de dosimetría personal del Departamento de Dosimetría de la Comisión Chilena de Energía Nuclear en el periodo 2000-2021"**, dirigida por la **Prof. Marianela Hervías**, académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, la **Prof. María José Yáñez** y el **Prof. Ricardo Videla**, ambos de la Comisión Chilena de la Energía Nuclear.

La Escuela de Tecnología Médica designó para su corrección una Comisión integrada por: **Prof. Daniel Castro**, académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile y la **Prof. Paulina Belmar**, académica de UC-CHRISTUS

La calificación obtenida se detalla a continuación:

| | | |
|--------------------------------------|------|-----|
| Corrector 1 Fca. Med. Paulina Belmar | 6.95 | 25% |
| Corrector 2 T.M. Daniel Castro | 5.52 | 25% |
| Tutor(es) Guía: | | |
| Evaluación Intermedia | 6.53 | 25% |
| Nota final tutor | 7.00 | 25% |
| Nota final tesis profesional | 6.50 | |

En consecuencia el estudiante **Gabriel Alberto Rius Zúñiga** aprueba satisfactoriamente la asignatura.



Prof. Denisse Karl Sáez
Coordinador(a) curso
Trabajo de Investigación



Prof. Hernán Torres Rivera
PEC curso
Trabajo de Investigación

ACTA CURSO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El Sr. **Matias Ignacio Silva San Juan**, estudiante de Tecnología Médica con Mención Imagenología, Radioterapia y Física Médica, cumpliendo con los requisitos establecidos en el plan de estudio, realizó durante el noveno semestre de la carrera, la Tesis Profesional titulada: *"Revisión retrospectiva de los registros de dosimetría personal del Departamento de Dosimetría de la Comisión Chilena de Energía Nuclear en el periodo 2000-2021."*, dirigida por la **Prof. Mariana Hervías**, académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, la **Prof. María José Yáñez** y el **Prof. Ricardo Videla**, ambos de la Comisión Chilena de la Energía Nuclear.

La Escuela de Tecnología Médica designó para su corrección una Comisión integrada por: **Prof. Daniel Castro**, académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile y la **Prof. Paulina Belmar**, académica de UC-CHRISTUS

La calificación obtenida se detalla a continuación:

| | | |
|---|------|-----|
| Corrector 1 Fca. Med. Paulina Belmar | 6.95 | 25% |
| Corrector 2 T.M. Daniel Castro | 5.52 | 25% |
| Tutor(es) Guía: | | |
| Evaluación intermedia | 6.53 | 25% |
| Nota final tutor | 7.00 | 25% |
| Nota final tesis profesional | 6.50 | |

En consecuencia el estudiante **Matias Ignacio Silva San Juan** aprueba satisfactoriamente la asignatura.



Prof. Denisse Karl Sáez
Coordinador(a) curso
Trabajo de Investigación



Prof. Hernán Torres Rivera
REG curso
Trabajo de Investigación

Página Inicial

Dedicatoria

La elaboración de este trabajo quiero dedicársela especialmente a mis padres, quienes me apoyaron y contuvieron en todo momento, no solo en el desarrollo de este, sino que a lo largo de todo el proceso de formación universitaria. Gracias a ellos he aprendido a enfrentar todas las dificultades que se me han presentado, sin perder nunca la cabeza ni morir en el intento. Me han enseñado a ser la persona que soy hoy. Mis principios, mis valores, mi perseverancia es el legado que me han entregado para ser mejor cada día. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio. También quiero dedicarle este trabajo a mi hermano menor Javier, quien desde que nació no ha parado de brindarme su amor, lo cual siempre me ha animado, iluminado y permitido seguir adelante. A toda mi familia, tías, tío y primos que desde que tengo memoria han estado junto a mi, y que sin darse cuenta han sido un aporte a mi crecimiento personal y han hecho de mi una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor. Y por último, no puedo dejar de lado a mis amigos incondicionales, un reconocimiento especial, ya que durante todo este camino me han demostrado y dado su apoyo, ánimo y consejos.

Lo que fui, soy y seré es producto de todos ustedes.

-Matías Silva

Dedicatoria

Cuando uno entra a la universidad siempre piensa en lo académico, en no reprobado un curso, en las presentaciones, en los exámenes, pero, una vez llega el final, es lo que uno menos recuerda. Esto diría que se trata de entender, conocer, encontrar y cambiar a través de las dificultades de este viaje.

Le dedico esto a familia, que me acompañó y respaldó en mi vida universitaria, en las dificultades que representó la pandemia, les agradezco los valores inculcados que me permitieron llegar aquí.

A mis amigos, aquellos que estuvieron desde el principio y a aquellos que se perdieron con el tiempo, por las risas, por los momentos de estrés, por demostrar que no hay que tenerle miedo a los cambios y que siempre se puede mejorar.

A mi "*Parrita*", que es apoyo, motivación y luz de cambio. A mis compañeros de aventuras, que no hacen falta nombrar para que estén presentes, que me abrieron los ojos a nuevos mundos. Y finalmente, dedico esto a mi yo de hace 5 años, que no esperaba ser los colores de hoy.

-Gabriel Rius

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias por la compañía, apoyo, comprensión y contención en estas últimas instancias de desarrollo como profesionales.

A nuestros tutores María Yañez, Ricardo Videla y Marianela Hervias por su ayuda, compromiso y confianza puesta en nuestro trabajo.

Al equipo de la sección de vigilancia radiológica individual del servicio de dosimetría personal externa, que nos abrió sus puertas y nos enseñó cómo llevan a cabo su labor de registro dosimétrico, con el cual se construyó la base de datos en que se basó este trabajo.

También agradecemos a nuestra asesora metodológica, Prof. Denisse Karl por su ayuda, asesoría, guía y paciencia en el desarrollo de este trabajo.

Por último, agradecemos a todos los docentes, amigos y otros que nos ayudaron a alcanzar nuestras metas tanto personales como académicas, hacernos compañía en los pasillos de la facultad y habernos ayudado a convertirnos en las personas que somos hoy.

Índice

| | |
|--|----|
| Índice | 8 |
| 1. Resumen. | 9 |
| 2. Introducción. | 10 |
| 2.1 Efectos biológicos de la radiación. | 10 |
| 2.2 Legislación Nacional y límites de dosis ocupacionales. | 12 |
| 2.3 Reportes internacionales y compromisos de Chile. | 14 |
| 2.4 Magnitudes radiológicas operacionales. | 16 |
| 2.5 Servicio de dosimetría personal externa de la Comisión Chilena de Energía Nuclear. | 17 |
| 2.6 Registro Nacional de Dosis (RND). | 19 |
| 2.7 Relevancia e importancia. | 20 |
| 3. Pregunta de investigación y objetivos. | 21 |
| 4. Materiales y Metodología. | 22 |
| 5. Resultados. | 29 |
| 6. Discusión. | 48 |
| 7. Conclusión. | 54 |
| 8. Bibliografía | 56 |
| 9. Anexos | 60 |

1. Resumen.

El uso de la radiación ionizante no está exento de riesgos, es por esto que por norma se realiza vigilancia radiológica personal a todo trabajador expuesto ocupacionalmente. La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) ofrece el servicio de dosimetría personal externa, contando con un largo historial de datos de los clientes que solicitaron este servicio, y en base al cual este estudio realiza un análisis descriptivo de la información abarcada en el periodo del año 2000 a 2021, mediante una base de datos previamente anonimizada. Se utilizaron herramientas Excel 365, STATA 13 y Join-Point Regression, en base a información epidemiológica y dosis equivalente personal Hp(10).

Al excluir las entradas menores al nivel de registro, se obtuvieron 369.322 registros Hp(10). Se encontró una mediana de 40 años y, para los que tenían información del sexo, una proporción de 42,8% femenino y un 57,2% masculino. En cuanto a la información dosimétrica, se observó una mediana Hp(10) de 0,32 mSv (IC:0,19-0,53 mSv) y una mediana de la dosis equivalente anual de 1,21 mSv (IC: 0,71-1,9 mSv). Se encontró que la dosis equivalente anual era mayor en hombres ($p < 0,05$). La mayor frecuencia de valores de alerta se encuentra en el área industrial, teniendo esta área una dosis equivalente anual mayor que el área médica ($p < 0,05$). Se observó una tendencia a la disminución de la mediana de la dosis equivalente anual desde el 2018 (Pendiente 2000-2018: 0,02 - 2018-2021: -0,19), junto con una disminución en la cantidad de valores de alerta en la última década.

Se espera con este estudio, fomentar la generación de publicaciones a nivel nacional para una descripción más detallada de la realidad chilena de la vigilancia radiológica.

2. Introducción.

Cuando hablamos de la contribución respecto al uso radiación en diferentes actividades diarias su utilidad es innegable; sin embargo, su uso también incluye riesgos. Es aquí en donde el marco regulatorio nacional tiene como objetivo proteger a las personas y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes (1). Los riesgos de radiación para los trabajadores, el público y el medio ambiente derivado de sus aplicaciones deben evaluarse y, si es necesario, controlarse, que es más común en el caso de los trabajadores, a excepción de los pacientes y la radiación de origen natural (2).

2.1 Efectos biológicos de la radiación.

El origen de los efectos biológicos de la radiación proviene de la capacidad que tienen las radiaciones ionizantes de depositar su energía en ciertas moléculas del organismo, alterando su estructura química, entre las que se pueden encontrar componentes de importancia para el funcionamiento celular, como lo es el ADN y otras moléculas. Atendiendo a la naturaleza del daño producido por la radiación en las células, los efectos biológicos se clasifican en estocásticos y deterministas (3-4).

Los efectos deterministas se presentan como reacciones tisulares, las cuales aparecen al morir numerosas células en un órgano o tejido. El efecto será observable clínicamente si la dosis de radiación está por encima de un umbral de 100 mGy. La existencia de este umbral determina que las dosis de radiación bajo este umbral no presentan de forma clínicamente relevante un daño a una población de células, mientras que con dosis crecientes por sobre este umbral, aumenta la probabilidad de ocurrencia, severidad y disminución de capacidad de recuperación del tejido (3-5).

Los efectos estocásticos aparecen tras la producción de daño por radiación al ADN de una célula de forma irreversible e irreparable, el cual origina una célula transformada capaz de reproducirse y de transmitir mutaciones a su progenie, esto es influenciado por agentes externos e inmunes lo que puede llevar a una condición de malignidad (5).

La probabilidad de ocurrencia del efecto estocástico aumenta con la dosis de radiación, donde a dosis bajas se comporta de manera lineal, mientras que a dosis más altas la probabilidad aumenta más abruptamente que con una proporcionalidad simple (5). En el caso de que las dosis se acerquen al umbral de efectos deterministas, la probabilidad aumentará de forma más lenta e incluso puede comenzar a disminuir debido al efecto competitivo de la muerte celular. Por otro lado, la severidad del efecto estocástico no depende de la dosis, sino de la localización, características y naturaleza de la célula e individuo afectado (5).

Las consecuencias se verán expresadas mediante efectos somáticos como aparición de cáncer y tumores, o a través de efectos hereditarios como, por ejemplo, posterior a la exposición de células germinales a la radiación se podría generar un traspaso de mutaciones genéticas a la descendencia (3-5).

Debido a que el uso de radiación ionizante puede ser perjudicial, se aplican 3 principios de protección radiológica en todas las prácticas que implican su uso:

- 1) El primer principio es el "principio de Justificación", es decir, cualquier decisión que altera la situación de exposición a la radiación, deberá ocasionar más beneficios que daño (3). Esto significa que las aplicaciones de la radiación ionizante deben conducir a mejoras en la calidad de vida en vez de exponer a las personas a potenciales daños. Un ejemplo de esto es el caso de las aplicaciones de uso médico, que tienen un fin terapéutico o diagnóstico, abarcando áreas como la radiografía, tomografía computada, angiografía, medicina nuclear, entre otras (5). Por el contrario, en el área

industrial, su utilización abarca desde la evaluación de materiales y procesos industriales hasta la aplicación en la industria alimentaria (6).

- 2) El segundo principio es el “principio de Optimización”, que expresa que cualquier tipo de exposición, tanto médica como ocupacional, debe mantenerse y limitarse a los niveles más bajos de dosis como sea razonablemente posible (3).
- 3) El tercer principio es el “principio de Limitación de Dosis”, que es aplicable sólo a situaciones planificadas, excluyendo exposiciones médicas, y que busca que la dosis de radiación recibidas por los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE) no sobrepasen los límites establecidos por la legislación nacional vigente y la literatura internacional (3).

2.2 Legislación Nacional y límites de dosis ocupacionales.

En Chile se ha legislado laboralmente la obligatoriedad de dosimetría personal desde el año 1985 mediante el Decreto Supremo N.º 3/1985 (7). En esta reglamentación, se establecen limitaciones anuales de dosis permitida y condiciones para el funcionamiento de los Servicios de Dosimetría Personal Externa (SDPE). Actualmente, existen 9 servicios de dosimetría habilitados por el Ministerio de Salud para realizar funciones de laboratorio de dosimetría personal. Los servicios se pueden diferenciar según la tecnología utilizada, pudiendo ser filmica, termoluminiscente o luminiscencia ópticamente estimulada (9). En específico, el Decreto Supremo N°3 Artículo 7, menciona al servicio de dosimetría de la Comisión Chilena de Energía Nuclear como uno de los servicios de dosimetría externa habilitados para realizar las mediciones (7).

La información recolectada de los SDPE es entregada trimestralmente al Instituto de Salud Pública de Chile (ISP), el cual tiene la labor de realizar un historial dosimétrico de las dosis

recibidas en todas las instalaciones donde se desempeña un trabajador ocupacionalmente expuesto, independiente del SDPE que prestó su servicio de dosimetría personal. La información entregada al ISP contiene los datos del trabajador (lugar del trabajo y funciones específicas que desempeña en las instalaciones), dosis absorbidas por el trabajador y nombre del empleador (7). Mediante esta información, el ISP realiza el Informe “*Vigilancia Radiológica Personal Ocupacional Radiaciones Ionizantes*” que, desde el año 2007 hasta la actualidad, recolecta de forma anual la información respecto a la cantidad de valores de alerta que contienen diferentes áreas de trabajo (10).

Actualmente, en Chile el sistema de vigilancia que usa el ISP respecto a los valores de dosis de alerta, se basa en los límites de dosis secundarios derivados de lo establecido en Chile y de las recomendaciones de organismos internacionales (10). En la publicación N°60, N°103 y N°118 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP en inglés) se plantean los límites de dosis recomendados para situaciones de exposición planificada, los cuales se comparan a los actualmente ocupados en Chile para profesionales ocupacionalmente expuestos mediante el Decreto Supremo N°3/1985 en la Tabla 1 (3-7-11-12). La CCHEN mediante el documento “Criterios básicos de Protección Radiológica” o “NORMA DE SEGURIDAD NS-02.0”, basada en la literatura de carácter normativo emitida por instituciones internacionales, establece el requerimiento de Protección Radiológica que se aplica en instalaciones nucleares o radiactivas para la evaluación que debe efectuarse en el desarrollo de procesos de licenciamiento y fiscalización. En términos prácticos, por lo tanto, los límites ocupacionales utilizados en las instalaciones nucleares o radiactivas coinciden a lo estipulado en las publicaciones internacionales expresadas en la Tabla 1(13).

Tabla 1: Comparación de límites de dosis ocupacionales según el DSN°3 y las publicaciones N°60, N°103 y 118 de ICRP.

| Órgano expuesto | Límite anual DSN°3/1985 | Límite anual internacional | Límite secundario trimestral DSN°3 | Límite secundario trimestral internacional |
|---|-------------------------|---|------------------------------------|--|
| Cuerpo completo (Dosis efectiva) | 5 rem (50 mSv) | 20 mSv/año por 5 años consecutivos o 50 mSv en un año | 12,5 mSv | 5 mSv |
| Cristalino (Dosis equivalente) | 30 rem (300 mSv) | 20 mSv/año por 5 años consecutivos o 50 mSv en un año | - | - |
| Extremidades (Dosis equivalente) | 50 rem (500 mSv) | 500 mSv/año | 125 mSv | 125 mSv |

En la Tabla 1 se muestran los valores de dosis equivalente o efectiva, dados para exposiciones planificadas que se basan según lo indicado por el ICRP en su publicación 60 respecto al grado de “tolerabilidad” de una exposición en relación al detrimento provocado por dosis recibida. De esta forma se utilizan 3 conceptos para definir el grado de tolerabilidad siendo estos: inaceptable, tolerable y aceptable, que tienen en consideración que esta es una descripción de carácter subjetivo que depende del tipo y fuente de la exposición. En este contexto, los límites de dosis representan un rango entre lo inaceptable y lo tolerable para la situación en que se aplica (11).

El límite secundario trimestral, es un valor que define el ISP como una dosis considerada como “significativa”, valor que coincide con el límite secundario trimestral expuesto por el ICRP 60 y 103 (3-11), de forma que cuando se supera este valor de dosis, se debe notificar al ISP. Esta notificación inicia un proceso de investigación para conocer las posibles causas de la dosis recibida o si es efectivamente una dosis que recibió el TOE. Como resultado de

esta investigación, se espera una evaluación de la factibilidad de implementar medidas de optimización de las prácticas (14).

El ISP, por otra parte, mediante el Ordinario N°1893 considera que se debe aplicar el criterio de nivel de registro. En este sentido, se determina el valor de nivel de registro igual a 0,1 mSv, de forma que dosis menores a este valor se registran como MNR (menor al nivel de registro) (15).

2.3 Reportes internacionales y compromisos de Chile.

Adicionalmente a la legislación nacional, Chile a lo largo de los años se ha suscrito a tratados, acuerdos y convenciones internacionales en el ámbito de la radiación ionizante, que implican múltiples obligaciones y compromisos para el país (16). Varios de estos han sido impulsados por la Organización Internacional de Energía Nuclear (OIEA), de la cual Chile es parte desde el año 1960, promoviendo 3 posiciones generales (17):

- 1) Reconocimiento a la importancia del programa de cooperación técnica del OIEA.
- 2) Respaldo al fortalecimiento del régimen jurídico internacional de la seguridad nuclear y radiológica a través de instrumentos jurídicos pertinentes y las actividades del OIEA para elevar estos parámetros.
- 3) Expresa apoyo a actividades del OIEA en materia de salvaguardias, lo cual es fundamental para preservar la naturaleza exclusivamente pacífica de los programas nucleares.

Por otra parte, Chile también se ha sometido a exámenes por parte de la OIEA. Por ejemplo, Chile suscribió en el año 2018 un Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria (IRSS) (18), el cual ofrece una revisión integrada de la examinación de los aspectos comunes del marco nacional, jurídico y gubernamental de los estados, así como de su infraestructura de reglamentación de la seguridad nuclear o radiológica y, además, emite

recomendaciones (19). La revisión respecto a la exposición ocupacional de la misión IRSS expone lo siguiente:

- Los límites de dosis expuestos en el Decreto supremo N 3/1985 no coinciden con las recomendaciones del OIEA.
- No existen requerimientos sobre la protección en la regulación para trabajadores de vuelo debido a radiación cósmica, ni tampoco para trabajadores desempeñados en emergencias.
- No existen requerimientos en la regulación para los servicios de monitorización en el lugar de trabajo.
- La legislación no incluye el requerimiento de promover una cultura de seguridad, así como la cooperación entre trabajadores y otras partes autorizadas si son diferentes.
- No existe requerimiento regulatorio para mantener un registro de dosis en el RND en el tiempo.

Se observa que en Chile se complementa parcialmente lo estipulado de forma regulatoria mediante otras acciones, por ejemplo, la “NORMA DE SEGURIDAD NS-02.0” complementa los límites de dosis ocupacionales estipulados y, por otra parte, los laboratorios de dosimetría y el RND del Instituto de Salud Pública si mantienen un registro de dosis en el tiempo (10-13).

2.4 Magnitudes radiológicas operacionales.

La Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (ICRU en inglés) a través de sus distintos reportes define un grupo de magnitudes radiológicas operacionales, las cuales proveen una estimación de exactitud aceptable de las magnitudes relacionadas con la protección radiológica, ya que estas en la práctica no son medibles (3-20). La definición de la magnitud radiológica operacional “dosis equivalente personal”, definida por la ICRU en 1993

(21) resulta la de más interés en el análisis de la dosis del trabajador ocupacionalmente expuesto.

“La dosis equivalente personal, $H_p(d)$, es la dosis equivalente en tejido blando, a una apropiada profundidad “d”, bajo un punto específico en el cuerpo. Unidad: $J\ kg^{-1}$. El nombre especial por la unidad de la dosis equivalente personal es sievert (Sv)” (21).

En la práctica se elige $H_p(10)$ a una profundidad de 10 mm para evaluación de dosis efectiva asumiendo una exposición uniforme a cuerpo completo. Para evaluación de dosis de piel y extremidades se usa la magnitud $H_p(0,07)$ y se ha propuesto la profundidad de 3mm para la vigilancia de la dosis al cristalino, el cual en la práctica raramente se vigila radiológicamente, empleándose para el mismo motivo la $H_p(0,07)$ (3-8-21).

Rutinariamente la estimación de las magnitudes operacionales de dosis de exposición personal a fuentes de radiación externa es mediante el uso de dosímetros personales colocados sobre el cuerpo. Si el dosímetro es usado en una posición del cuerpo que represente de buena manera su exposición a la radiación, esté expuesto a dosis bajas y asumiendo una exposición uniforme del cuerpo, el valor $H_p(10)$ puede representar una dosis efectiva ampliamente precisa que permita estimar los posibles efectos relativos de las radiaciones ionizantes en una persona irradiada a cuerpo completo (3) .

2.5 Servicio de dosimetría personal externa de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

El servicio de dosimetría de la CCHEN (en específico la sección de vigilancia radiológica individual del servicio de dosimetría personal externa), es un SDPE que está habilitado por el ISP para realizar dosimetría termoluminiscente (9). Este es uno de los primeros en desarrollarse en Chile y desempeña su labor desde 1974. Asimismo, presta sus servicios de dosimetría externa a cualquier empresa que necesite vigilancia dosimétrica a cuerpo

completo, extremidades o cristalino contando entre sus clientes a instalaciones industriales, médicas y otros.

El modo de trabajo del servicio de dosimetría comienza enviando dosímetros a las empresas solicitantes de vigilancia radiológica, identificadas mediante un código de serie que individualiza empresa, área de trabajo y al individuo. El área de trabajo se categoriza según la exposición ocupacional como médica, industrial o miscelánea.

Entre los años de estudio, se han utilizado 4 tipos de dosímetros en el departamento de dosimetría de la CCHEN para medir la dosis $H_p(10)$, entre los cuales se encuentran PD1, PD3, PD5 y PD8. Los últimos 3 mencionados, poseen características similares en cuanto a cristales termoluminiscentes y difieren en el equipo en que se realiza la lectura de los cristales de fluoruro de talio que se encuentran dentro del dosímetro. Algunas especificaciones técnicas de los dosímetros se pueden observar en el Anexo 1. Los dosímetros y los dispositivos de lectura se encuentran calibrados según el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI).

Los dispositivos de medición a cuerpo completo están calibrados para ser utilizados en el pecho y deben estar debajo de cualquier protección utilizada como los delantales plomados, de tal forma que imite la radiación que le llegaría al trabajador. El uso indebido del dosímetro, puede dar como resultado una dosis estimada poco representativa de la recibida por el TOE.

Tras transcurrir 3 meses, los dosímetros son retornados y se verifica el estado de los dosímetros devueltos, la integridad de todas las piezas y la concordancia del código de serie único con la persona a la que le correspondía el dosímetro. Este código permite que las diferentes mediciones de los dosímetros pueden ser seguidas en el tiempo.

Para asegurar la consistencia en los valores reportados, cada dosímetro incluye dos cristales para promediar las lecturas. En el caso de que las lecturas de los cristales disten un valor mayor o igual al 20%, se realiza un control de calidad para verificar si existe deterioro en

algún cristal para su deposición. La lectura final del dosímetro puede ser modificada en caso de que sea declarada como una situación anormal, en donde se compruebe que el trabajador ocupacionalmente expuesto no ha recibido la dosis de lectura estipulada. La situación anormal puede ser debido a que su dosímetro fue dejado cerca de una fuente de radiación u otra circunstancia a especificar.

2.6 Registro Nacional de Dosis (RND).

Un RND, como lo ha descrito el Organismo Internacional de Energía Atómica en su documento “*Occupational Radiation Protection*” (22), es el punto central de la colección y mantenimiento de registros dosimétricos, posibilitando la recuperación de esta información permitiendo tener un estimado de la dosis recibida en el ámbito laboral.

Según la OIEA, la implementación y mantenimiento de un historial dosimétrico a largo plazo, tiene múltiples objetivos entre los cuales se puede mencionar (23):

- Permite el control y el resguardo de registros de dosimetría personal
- Permite el análisis de la monitorización de dosimetría personal agrupada por varios aspectos como ocupación, edad, sexo, etc.
- Permite la ayuda del control regulatorio nacional mediante la notificación de sobre exposiciones.
- Permite la contribución al conocimiento científico e investigación de salud respecto a riesgos de la exposición ocupacional a la radiación.
- Permite proveer historiales de dosis a trabajadores individuales y organizaciones para la planeación respecto a protección radiológica y casos de litigación.

Las magnitudes de dosis registradas por individuo quedan en los registros de dosis a nivel nacional del ISP, por lo que toda persona que haya ocupado un dosímetro personal alguna

vez, posee un historial dosimétrico (7-10). Actualmente, en Chile poseemos un RND que ha avanzado en muchos de los objetivos anteriormente mencionados.

2.7 Relevancia e importancia.

La Comisión Chilena de Energía Nuclear al ser un prestador de dosimetría, posee una larga data de registros a nivel nacional que nunca se han estudiado de forma estadística, por lo cual, este estudio representa un beneficio directo e indirecto al servicio de dosimetría personal de la CCHEN en su quehacer profesional al poder categorizar valores de lectura normales o anormales estadísticamente.

La información obtenida relacionada a los registros de dosis, permite mejorar la base de datos actual y ayuda en la determinación de valores o variables relevantes. Los resultados pueden ser utilizados tanto para fines de optimización de la protección radiológica de los centros prestadores, como para los individuos expuestos a nivel epidemiológico.

Actualmente, en Chile existe un informe del año 2014 sobre el perfil de la exposición ocupacional a radiación ionizante y múltiples reportes respecto a valores de alerta de forma trimestral o anual; sin embargo, la literatura nacional carece de ciertos factores como lo son el análisis de categorías por edad, ocupación y sexo. Por lo tanto, presentar un análisis descriptivo de estas áreas, permite contribuir al conocimiento científico de una muestra de la población nacional (9-10-23). La información entregada mediante el análisis de la data, podría fomentar la creación de informes más completos a nivel nacional.

3. Pregunta de investigación y objetivos.

Considerando la información disponible por parte del departamento de dosimetría y la falta de análisis de los datos allí almacenados, nos planteamos los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Analizar la información dosimétrica personal de los trabajadores ocupacionalmente expuestos entre los años 2000 y 2021 en la población registrada por la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

Objetivos específicos:

- a) Describir la dosimetría personal anual que recibieron los profesionales ocupacionalmente expuestos entre los años 2000 y 2021, mediante la variable dosis equivalente anual, considerando edad, sexo y categorización del área de trabajo.
- b) Comparar la variable dosis equivalente anual que recibieron los trabajadores ocupacionalmente expuestos, considerando grupos por sexo y categorización del área de trabajo.
- c) Analizar la tendencia en el tiempo de la variable dosis equivalente anual del trabajador ocupacionalmente expuesto.
- d) Reconocer el área de trabajo de los prestadores con mayor cantidad de valores de alerta por año.

4. Materiales y Metodología.

Se realizó un estudio descriptivo observacional, en conjunto a estadística inferencial, utilizando un registro secundario derivado de la base de datos proveniente de los registros de dosis de la sección de vigilancia radiológica del servicio de dosimetría de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, correspondiente a uno de los laboratorios de dosimetría habilitado por el ISP. Este estudio se realizó mediante los softwares Microsoft Excel 365, Stata 13 y software Join-point Regression.

El laboratorio de dosimetría está actualmente habilitado para la lectura de Hp(10) mediante la técnica de termoluminiscencia, aunque también, ofrecen lectura Hp(7) y Hp(0,03), además de dosimetría personal interna, las cuales no se ocuparán en esta investigación.

Muestra a utilizar.

La muestra utilizada fueron todos los registros Hp(10) excluyendo los valores menor al nivel de registro, de los trabajadores ocupacionalmente expuestos que hayan sido parte de la base de datos del servicio de dosimetría externa de la Comisión Chilena de Energía Nuclear durante el periodo de estudio (1 de enero 2000 - 31 de diciembre del 2021) después del proceso de depuración especificado más adelante.

Base de datos.

Corresponde a un base de datos en formato Microsoft Excel a partir de registros de dosis equivalente personal del servicio de dosimetría de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

La información data desde el 1 de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre del 2021 y considera a todas las empresas e instituciones que contrataron el servicio de dosimetría personal externa con CCHEN entre las fechas ya mencionadas. Los datos correspondientes a la empresa o al TOE fueron anonimizados por parte del departamento de informática de la CCHEN y se entrega solo un número identificador que permite distinguir que corresponde a

una empresa y persona específica, de forma que, si fuera necesario, se podría realizar un seguimiento particular de un TOE.

Además, se extrajeron los datos respectivos a la dosis equivalente personal que corresponden a las dosis de lectura en todos los registros y la fecha de lectura. Este valor de dosis incluye la radiación de fondo recibida por el TOE, debido a que para obtener la radiación de fondo se debería entregar a cada cliente un dosímetro extra para estimar esta dosis, cosa que no realiza actualmente el servicio de dosimetría de la CCHEN. Debido a la ausencia de dosímetro testigo, no es posible discriminar si la dosis bajas corresponden a una exposición de fondo o exposición natural. Por otra parte, se extrajo información epidemiológica de todas las personas como su fecha de nacimiento y sexo registrado. Con respecto al área de trabajo, el sistema de informática de la CCHEN realiza una categorización en base a la información del cliente, por lo tanto, se relaciona el área de trabajo a una empresa o servicio de una empresa y no al TOE. Los campos en la base de datos se pueden observar en el Anexo 2.

La base de datos inicial contenía un número total de 837.595 registros, los cuales contienen información dosimétrica de los siguientes tipos de dosímetros: PD1, PD3, PD5, PD8, C y A, donde los dos últimos no se incluirán en este análisis, debido a que corresponden a dosímetros de estimación de dosis de extremidades y cristalino respectivamente, y no medición de cuerpo completo. Posteriormente al realizar un proceso de revisión de la data se observó la necesidad de realizar una depuración de información duplicada cliente, no utilizada o con formato erróneo. Los procesos fueron: eliminación de registros duplicados, remoción de data de dosímetros tipo A y C, eliminación de registros duplicados no considerando data del cliente, pero, sí el área de trabajo, eliminación de registros con formato de fecha de lectura erróneo, modificación a vacío de registros de la columna sexo debido a valor diferente del binario M/F o sin data. El Anexo 2 muestra un resumen numérico del proceso de depuración de la data.

Una vez terminado el proceso de depuración se obtuvieron un total de 386.430 registros que contienen información respectiva a un dosímetro y sus lecturas de dosis equivalente Hp(10), incluyendo los valores menores al nivel de registro (MNR).

Metodología

VARIABLES UTILIZADAS:

Se enlista la definición de variables relevantes utilizadas en la base de datos. Algunas de estas variables son derivadas de la base de datos original como lo son la variable edad, categorización MNR, categorización valor de alerta, dosis Hp(10) área sin MNR y dosis hp(10) sin MNR. Para mayor información respecto a los campos utilizados dentro del programa Excel 365 se puede observar el Anexo 3 y 4.

a) Hp(10)

Variable cuantitativa, corresponde al valor de lectura Hp(10) del dosímetro leído. Para el análisis de la información, se excluyeron registros categorizados como "MNR".

b) Área de Trabajo

Variable cualitativa, corresponde a una categorización del quehacer en el que estuvo expuesto el dosímetro. Existen 4 categorías: uso industrial, uso médico, miscelánea y sin información.

Debido a que algunos trabajadores poseían más de un área de trabajo, se explicita cuando se tiene en consideración esta variable para evitar duplicidad de información.

c) Edad por año cumplido o edad:

Variable cuantitativa discreta, corresponde a una variable derivada de la resta entre el año de lectura y año de nacimiento del TOE. Se realizan algunas excepciones para su cálculo debido a que se observan errores en el campo "Fecha de nacimiento".

Excepciones:

c.1) Año de nacimiento mayor al año de la fecha de lectura del dosímetro.

c.2) Edad de cálculo menor a 18: Se exceptúa debido a la imposibilidad teórica de un trabajador menor de edad, debido a que en Chile se legisla que los trabajadores ocupacionalmente expuestos deben ser mayor a 18 años, por lo que se entiende que los TOE poseen más de 18 años y existió mal registro en la fecha de nacimiento.

c.3) Edad de cálculo mayor a 90 años: Se exceptúa debido a la baja probabilidad práctica de observar trabajadores mayores de 90 años. Por otro lado, al analizar la data se observa un salto de edad en el rango de 88-90 años y registros con una edad calculada mayor a 100, por lo que se considera que existe mal registro de la fecha de nacimiento en estos casos.

d) Categorización MNR:

Variable cualitativa, corresponde a una variable derivada para categorización y futura exclusión dependiendo del campo dosis Hp(10). Donde para valores de dosis Hp(10) <0.1 mSv corresponde a "MNR" y para Hp(10) ≥ 0.1 mSv corresponde "Vacío".

e) Categorización valor de alerta:

Variable cualitativa, corresponde a una variable derivada para categorización del valor de dosis con respecto al "valor de alerta" establecido por el ICRP. Donde el registro con un valor de dosis Hp(10) ≥ 5mSv se considerará valor de alerta.

f) Dosis equivalente anual no MNR o dosis equivalente anual [mSv]

Variable cuantitativa, corresponde a una variable derivada de la sumatoria del campo Hp(10) categorizada como "no MNR" solo si coincide en la combinación de los campos "Cod TOE" y

“año de lectura”.

Para la operacionalización de esta variable, se hizo una combinación de los registros dependiente del campo “Cod TOE” y “año de lectura”. Esto de forma que se obtuviera un registro por cada año de registro de TOE.

g) Dosis equivalente colectiva no MNR o dosis equivalente colectiva [mSv.persona]

Variable cuantitativa, corresponde a una variable derivada de la sumatoria de todos los campos Hp(10) excluyendo valores MNR, se puede expresar también como el producto de la dosis Hp(10) promedio no MNR ($\underline{Hp(10)^*}$), en el grupo, por el número (N) de individuos en ese grupo, es decir, se expresa en Sv. persona.

$$Dosis\ equivalente\ colectiva = \sum Hp(10)_i^* = \underline{Hp(10)^*} \times N$$

Donde: Hp(10)* = Valor de lectura Hp(10) excluyendo valores menor a 0,1 mSv (MNR).

N = Número de individuos en el grupo

$\underline{Hp(10)^*}$ = Promedio de Hp(10)*

Exclusión categorización MNR.

Se realizó exclusión de los registros categorizados como menores al nivel de registro (MNR), es decir, con un valor de dosis Hp(10) <0.1 mSv, debido a los siguientes factores encontrados en este rango:

- 1) Principio de nivel de registro considerado por el ISP.
- 2) Se encuentra data teóricamente incompatible con la base de datos, por ejemplo:
 - a) Dosis de lectura negativa.
 - b) Dosis de lectura menor al rango de detección posible por los dosímetros.

Métodos estadísticos ocupados.

Prueba estadística de normalidad: Shapiro Wilk

Corresponde a una prueba estadística para comprobar la normalidad de un conjunto de datos. Tiene como base plantear la hipótesis nula en la cual la muestra proviene de una población normalmente distribuida y la hipótesis alternativa en donde la muestra proviene de una población distribuida no normal o no paramétrica (24).

El test de Shapiro Wilk finalmente intenta rechazar matemáticamente la hipótesis nula a un nivel de significancia escogido, de forma que se rechaza la hipótesis nula cuando el valor de probabilidad (p) es menor al nivel de significancia. En nuestro estudio se utilizó para todas las pruebas estadísticas un nivel de significancia del 95% ($p\text{-valor} \leq 0.05$).

Prueba estadística de comparación: U Mann Whitney

También llamada como Mann-Whitney-Wilcoxon. Corresponde a una prueba estadística para comparar la distribución de dos muestras no paramétricas independientes. En términos prácticos, esta prueba ordena de forma ascendente cada muestra y las compara de forma ordenada. La hipótesis nula de esta prueba estadística estipula que las 2 muestras o grupos provienen de la misma población, en otros términos, estipula que los 2 grupos son homogéneos y tienen la misma distribución. Esta hipótesis también puede colocarse en términos de la mediana, por lo tanto, si la hipótesis nula no es rechazada significa que las medianas de cada grupo son similares (25).

Prueba estadística de comparación: Kruskal-Wallis

Corresponde al equivalente no paramétrico de la prueba estadística ANOVA. Esta prueba no asume una distribución normal de la muestra, pero sí asume que las muestras a comparar sean al azar e independientes. Este test es básicamente una extensión de la prueba

estadística U de Mann Whitney para más de 2 grupos independientes, teniendo una hipótesis nula extendida para más de 2 grupos (26). Cuando esta prueba es significativa, al menos una de las muestras es diferente al resto; sin embargo, esta prueba no determinará cuál de las muestras es diferente o cuantas muestras diferentes existen.

Prueba estadística de correlación: Spearman

Consiste en una prueba no paramétrica de correlación de rangos. Esta evalúa la relación monotónica entre dos variables y se utiliza cuando se ven enfrentados a datos que poseen valores extremos, puesto que dichos valores influyen en gran cantidad el coeficiente de Pearson (27). Esta prueba estadística da como resultado el coeficiente de correlación de spearman o *rho* que se distribuye entre [+1,-1]. De esta manera, resulta 0 cuando las variables son independientes y se encuentra entre los valores +1 y -1 cuando existen relaciones positivas o negativas.

Join-Point Regression

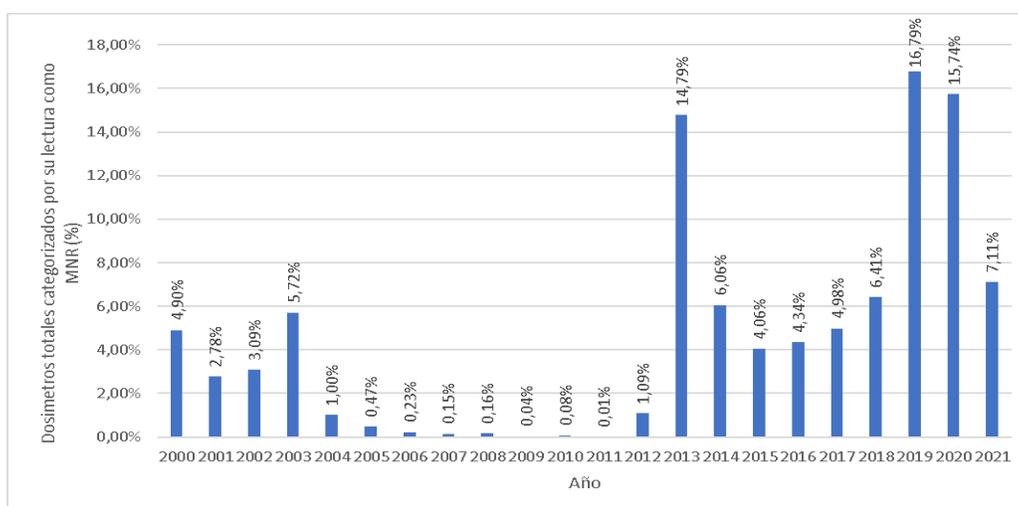
Es un software estadístico para el análisis de tendencias utilizando modelos de punto de unión o Joinpoint, en donde el programa opera con datos de tendencia proporcionados por el usuario y límite de joinpoints deseados. Posteriormente ajusta el modelo de punto de unión más simple que permiten los datos y comprueba si existen puntos de unión estadísticamente significativos, generando un gráfico para cada modelo de puntos de unión, desde el modelo con el número mínimo de puntos de unión hasta el modelo con el número máximo de puntos de unión. De esta manera, permite buscar la mejor manera de mostrar un cambio aparente en las tendencias (28).

5. Resultados.

Resultados relacionados al dosímetro.

La base de datos contiene información de 386.430 registros distribuidos entre los años 2000 a 2021. Luego de prescindir de los valores de dosis registrados como “MNR” del total, es decir, de los valores registrados menores a 0,1 mSv, se obtienen 369.322 registros con un valor mayor o igual a 0,1 mSv.

Figura 1: Dosímetros categorizados como MNR (<0,1 mSv) entre el año 2000 a 2021.



En la figura 1 podemos observar el número de registros categorizados como “MNR” según año de lectura. En esta se puede observar que la cantidad de registros categorizados como “MNR” aumenta desde el año 2013 en adelante. Esta data, como se describió anteriormente, no se utilizará para el análisis de la base de datos desde ahora en adelante.

Se realiza un análisis exploratorio para los 369.322 dosímetros observados en la Tabla 3 de la variable Hp(10) para la obtención de medidas descriptivas de la muestra.

Tabla 3: Medidas estadísticas relacionadas al valor lectura dosimétrico Hp(10).

| Rango de dosis equivalente anual (mSV) | Rango intercuartil | | | Promedio (mSv) | Desviación Estándar |
|--|--------------------|------|------|----------------|---------------------|
| | P25 | P50 | P75 | | |
| 0,1 - 776,75 | 0,19 | 0,32 | 0,53 | 0,53 | 3,12 |

Entre estas lecturas dosimétricas se observan 1859 con una dosis Hp(10) mayor o igual a 5 mSv, 498 con un valor de dosis Hp(10) mayor o igual a 12,5 mSv y 27 con una dosis Hp(10) mayor o igual a 100 mSv.

Al examinar el número de registros por año, se observa en el año 2.000 un 2,25% de todos los registros, lo que va en posterior aumento hasta el 2.016 con un peak de registros del 7,48% y luego una disminución hasta el año 2.021 (3,66% del total). En el año 2.011 se aprecia una caída abrupta en la cantidad de registros (1,69% del total).

- Edad:

Se observan 274.560 (74,34%) registros que poseen un formato de fecha de nacimiento válido y que al operacionalizar la variable resultaban en un valor de edad entre los 18 a 88 años. Por otro lado, existen 94.762 (25,66%) registros con una fecha de nacimiento con un formato inválido.

- Sexo:

Se encuentra un total de 220.104 registros con una identificación en el campo "Sexo", del cual 128.856 (34,89%) de los registros está categorizado como "M" (masculino) y 91.248 (24,71%) de estos está clasificado como "F" (femenino), mientras que 149.218 (40,4%) se encuentran sin información en esta categoría.

- Área de trabajo:

Se encuentran 4 categorizaciones de área de trabajo, siendo estas: miscelánea, uso industrial, uso médico y sin información. Debido a que algunos trabajadores poseen más de una categorización en el área de trabajo, se obtienen 408.009 observaciones de un total de 369.322 registros.

En la tabla 4 se puede observar la cantidad de observaciones asociada a la categorización del área de trabajo, en donde se puede observar que existe un 61,41% de la data que no se le asocia una categoría de trabajo.

Tabla 4: Frecuencia de observaciones asociadas a la categorización de área de trabajo.

| Categorización de área de trabajo | Frecuencia* | Frecuencia relativa* | Frecuencia relativa* excluyendo "Sin info" |
|--|--------------------|-----------------------------|---|
| Misceláneas | 4038 | 0,99% | 2,56% |
| Sin información | 250555 | 61,41% | - |
| Uso Industrial | 41361 | 10,14% | 26,27% |
| Uso Médico | 112055 | 27,46% | 71,17% |
| Total general | 408009 | 100% | 100% |

*Se consideran registros con más de una categorización de área en todas las áreas de trabajo que le corresponda.

Resultados relacionados al trabajador anual.

Se realiza el cálculo y combinatoria para la obtención de la variable "dosis equivalente anual", ante esto se encuentra un total de 109.302 observaciones que corresponden a mediciones anuales de trabajadores en el periodo de 2.000 a 2.021 con una dosis mayor al mínimo nivel de registro determinado en Chile.

2021. En esta tabla se muestra un máximo de número de trabajadores en el año 2014 con 7222 trabajadores registrados y un mínimo en el año 2011 con 1864 trabajadores.

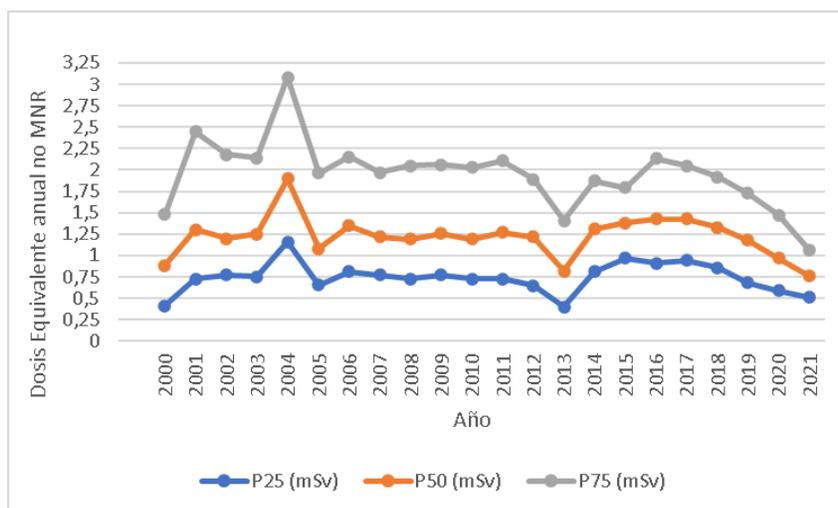
Tabla 6: Resumen de dosis equivalente anual y colectiva no MNR entre 2000-2021.

| Año | Número de Trabajadores | Dosis colectiva no MNR (mSv.persona) | P25 (mSv) | P50 (mSv) | P75 (mSv) |
|------|------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 2000 | 2602 | 3956,20 | 0,41 | 0,885 | 1,48 |
| 2001 | 2864 | 6129,96 | 0,725 | 1,3 | 2,45 |
| 2002 | 3087 | 7453,77 | 0,77 | 1,2 | 2,18 |
| 2003 | 3238 | 9745,73 | 0,75 | 1,25 | 2,14 |
| 2004 | 3500 | 10701,91 | 1,16 | 1,9 | 3,08 |
| 2005 | 3008 | 6885,11 | 0,655 | 1,08 | 1,965 |
| 2006 | 4243 | 9677,73 | 0,81 | 1,35 | 2,15 |
| 2007 | 4562 | 10340,19 | 0,77 | 1,22 | 1,97 |
| 2008 | 4954 | 9874,89 | 0,73 | 1,19 | 2,05 |
| 2009 | 5697 | 10489,46 | 0,77 | 1,26 | 2,06 |
| 2010 | 6357 | 11817,34 | 0,73 | 1,19 | 2,03 |
| 2011 | 1864 | 3620,74 | 0,73 | 1,27 | 2,11 |
| 2012 | 6872 | 11310,96 | 0,65 | 1,22 | 1,89 |
| 2013 | 7082 | 8784,73 | 0,4 | 0,82 | 1,41 |
| 2014 | 7222 | 11550,53 | 0,81 | 1,31 | 1,87 |
| 2015 | 6791 | 10564,85 | 0,97 | 1,38 | 1,79 |
| 2016 | 6794 | 12202,74 | 0,91 | 1,43 | 2,13 |
| 2017 | 6462 | 10947,32 | 0,94 | 1,43 | 2,05 |
| 2018 | 6182 | 10387,60 | 0,86 | 1,33 | 1,92 |
| 2019 | 5865 | 8254,73 | 0,68 | 1,18 | 1,73 |
| 2020 | 5223 | 6310,07 | 0,59 | 0,97 | 1,47 |

| | | | | | |
|------|------|---------|------|------|------|
| 2021 | 4833 | 4724,56 | 0,51 | 0,76 | 1,06 |
|------|------|---------|------|------|------|

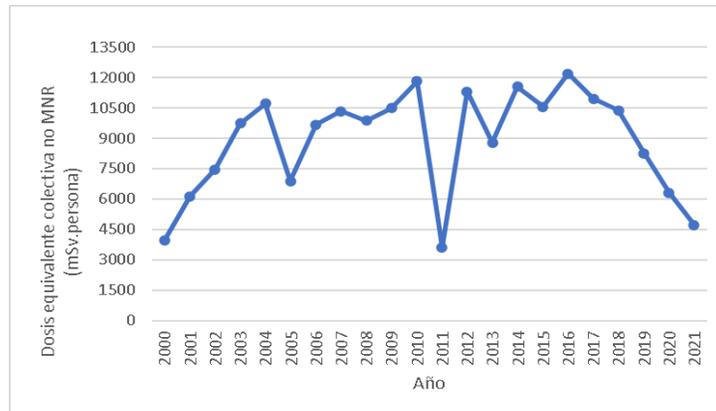
En la figura 3 se observa la variable dosis equivalente anual representada por su mediana y rango intercuartil en los años de estudio. En esta figura se puede observar que los años 2004 y 2013 existe un cambio notorio de las medidas descriptivas, mientras que a partir del año 2016 existe una disminución en el valor del rango intercuartil.

Figura 3: Dosis equivalente anual entre el año 2000-2021.



En la Figura 4, se puede observar la dosis equivalente colectiva anual, que considera el total de todos los valores de dosis por trabajador por año en el periodo de estudio, esta dosis no es extrapolable a términos de conducta de exposición ocupacional del trabajador, debido a la influencia de la variación de la cantidad de personas controladas anualmente. Se observa un máximo en el año 2016 con 12.202,74 mSv y un mínimo en el año 2011 con 3620,74 mSv.

Figura 4: Gráfico de línea de la Dosis equivalente colectiva en función del año de estudio.



Hallazgos relacionados con la edad.

Realizada la operacionalización de la variable dosis equivalente anual se obtienen 80.556 observaciones válidas, es decir, con un formato de fecha de nacimiento válido de un total de 109.302 observaciones.

En la tabla 7, se muestran las medidas estadísticas respecto a la variable edad de las 80.556 observaciones encontradas.

Tabla 7: Medidas estadísticas resumen relacionadas a la edad.

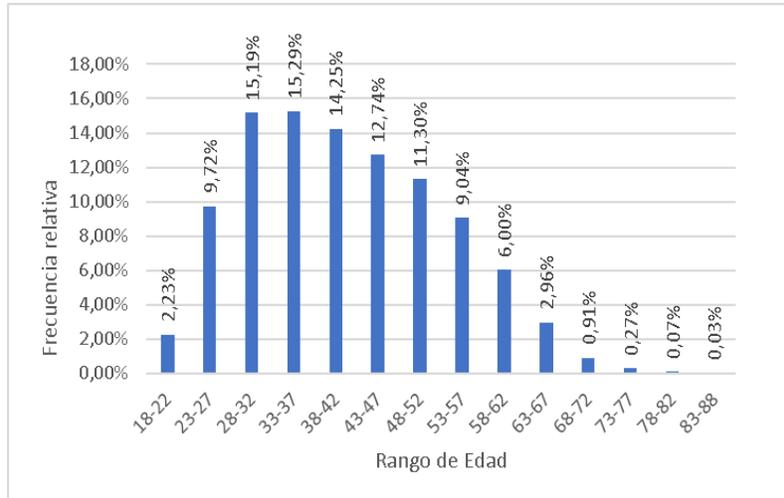
| Rango de edad | Rango Intercuartílico | | | Promedio | Desviación Estándar |
|---------------|-----------------------|-----|-----|----------|---------------------|
| | P25 | P50 | P75 | | |
| 18-88 | 32 | 40 | 50 | 41,28 | 11,7 |

Al realizar prueba Shapiro-Wilk se determina un comportamiento no paramétrico de la variable ($z = 17,811$ $p = 0.00001$).

En la figura 5, se observa la distribución de la frecuencia relativa de la variable edad por rangos de edad durante todo el periodo de estudio. Se observa que el rango de 33-37

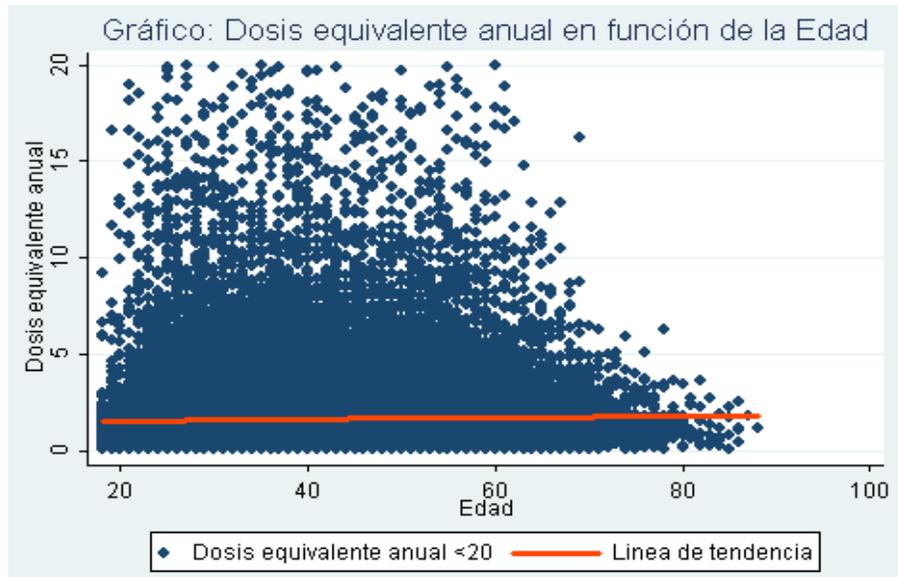
años posee la frecuencia relativa más alta del grupo con un 15,29% del total de trabajadores.

Figura 5: Histograma de la distribución de la variable edad en base a rangos de edad.



Se realiza la prueba estadística de correlación de Spearman entre la variable Dosis equivalente personal anual con los valores <20 mSv y variable edad. El resultado de esta prueba estadística determina que existe una correlación positiva significativa muy débil ($\rho=0,0850$ $p=0,0001$). Debido a la gran cantidad de datos, la información entregada por el gráfico scatter plot observado en la Figura 6 no es la óptima; sin embargo, nos permite observar la línea de tendencia en relación con la prueba de correlación de Spearman antes mencionada.

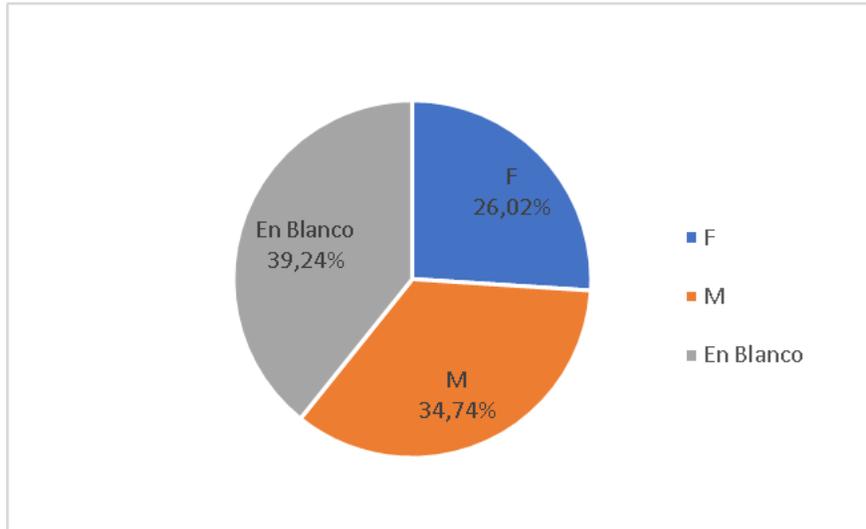
Figura 6: Gráfico de dispersión de los valores de dosis equivalente anual <20 mSv en función de la edad.



Categorización por sexo.

Realizada la operacionalización de datos para la variable dosis equivalente anual, se obtiene una cantidad de 66.408 observaciones con categorización por sexo F o M de un total de 109.302 observaciones, por lo tanto, existen 42.894 observaciones vacías o en blanco. Un total de 28.439 poseen una categorización "F" y un total de 37.969 corresponde a la categorización "M". La distribución porcentual de esta categoría se observa en la figura 7.

Figura 7: Distribución porcentual de la categoría sexo.



Al analizar la distribución de la proporción entre la categoría F (femenino) y M (masculino) por año, podemos ver que existe una gran diferencia en el año 2000, en donde un 15,35% corresponden a trabajadores de sexo femenino y 84,65% a masculino. Este valor va disminuyendo progresivamente hasta el año 2017 con valores porcentuales de 46,83% femenino y un 53,17% masculino, con una ligera diferencia el año 2018 con un 43,03% femenino y 56,92% masculino manteniéndose constante posteriormente.

En la figura 8 se aprecia un diagrama de caja para sexo femenino y masculino. El gráfico se restringió a dosis menores a 5mGy debido a la gran cantidad de valores atípicos que restringe la visualización de los diagramas. Por otro lado, en la tabla 8 se puede observar el número de trabajadores, dosis equivalente promedio y colectiva no MNR, además de los valores del rango intercuartil y mediana para la categorización por sexo.

Figura 8: Comparación de los rangos cuartiles de Dosis equivalente anual entre sexos.

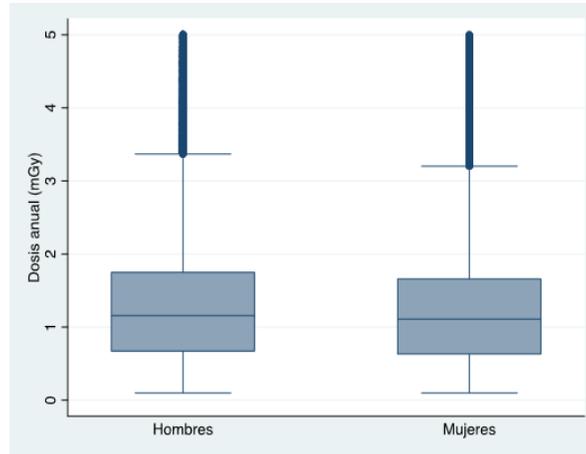


Tabla 8: Descripción de la muestra según la categoría de sexo en el periodo de estudio.

| Categorización | N | Dosis equivalente promedio anual no MNR (mSv) | Dosis colectiva no MNR (mSv.persona) | P25 (mSv) | P50 (mSv) | P75 (mSv) | P50 EDAD |
|-----------------|-------|---|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| F | 28439 | 1,43 | 40.663,39 | 0,63 | 1,12 | 1,7 | 35 |
| M | 37969 | 1,61 | 61.016,10 | 0,69 | 1,19 | 1,83 | 37 |
| Sin Información | 42894 | 2,19 | 94.051,63 | 0,8 | 1,31 | 2,15 | 44 |

Se realiza la prueba estadística de comparación de Mann-Whitney entre los valores de dosis equivalente anual <20 mSv de los grupos por categoría F y M. El resultado de esta prueba estadística determina que la hipótesis nula “la distribución de los valores de dosis equivalente anual entre la categorización femenino y masculino son iguales” es rechazada ($z= 11,757$ $p=0.0001$).

Categorización del área de trabajo.

Realizada la combinación con la variable dosis equivalente anual no MNR área, se obtiene un total de 118.449 observaciones de 109.302 trabajadores anuales respecto a la categoría del área de trabajo, debido a trabajadores con más de una clasificación de área de trabajo.

En la tabla 9 podemos observar el número de trabajadores, dosis equivalente promedio y colectiva no MNR, además del rango intercuartil y mediana de las 4 categorías de área de trabajo durante todo el periodo de estudio.

Tabla 9: Descripción de la muestra según la categoría de área de trabajo en el periodo de estudio.

| Á. trabajo | N* | Dosis equivalente promedio anual no MNR (mSv) | Dosis colectiva no MNR (mSv.persona) | P25 | P50 | P75 | P50 EDAD |
|-----------------|-------|---|--------------------------------------|------|------|------|----------|
| Misceláneas | 1420 | 1,567 | 2225,34 | 0,95 | 1,37 | 1,97 | 51 |
| Sin información | 78460 | 1,849 | 145080,58 | 0,7 | 1,22 | 1,93 | 40 |
| Uso industrial | 12504 | 2,511 | 31405,91 | 0,74 | 1,3 | 2,06 | 40 |
| Uso médico | 26065 | 1,895 | 49417,36 | 0,73 | 1,21 | 1,88 | 39 |

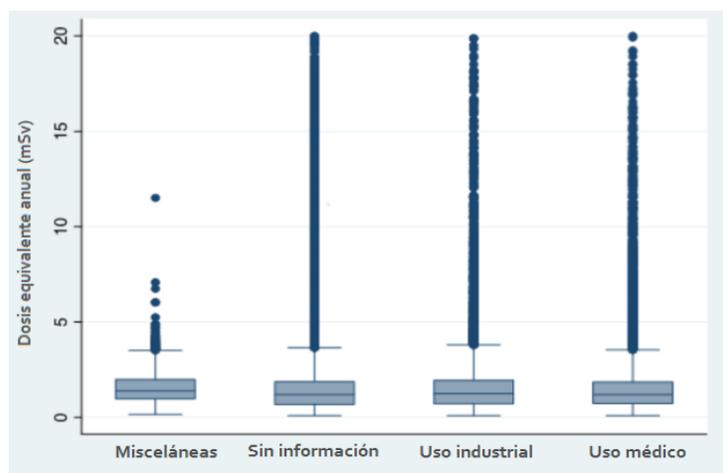
*Se consideran trabajadores con más de una categorización de área en todas las áreas de trabajo que le corresponda.

De lo extraído, se puede observar cómo están distribuidos los sexos registrados por áreas, mostrando que en el área industrial y miscelánea predominan los hombres con 85,4% (7065 masculino y 346 femenino) y 95,33% (630 masculino y 92 femenino) respectivamente. Por otro lado, en el área médica se observa mayor igualdad en la

distribución, en donde las mujeres representan el 49,53% (9437) de los trabajadores y los hombres el 50,47% (9263).

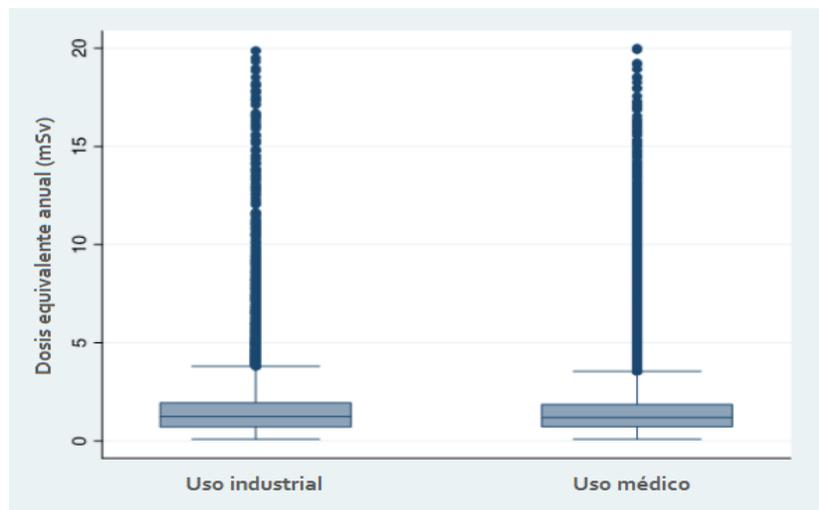
En la figura 9 se puede observar un diagrama de caja para las 4 categorizaciones de área.

Figura 9: Comparación de los rangos cuartiles de dosis equivalente anual según categorización de área.



Se realiza la prueba estadística de comparación kruskal wallis entre los valores de dosis equivalente anual <20 mSv de la categoría área de trabajo. El resultado de esta prueba estadística determina que la hipótesis nula “la distribución de los valores de dosis equivalente anual entre las diferentes categorías de área de trabajos son iguales” es rechazada ($p= 0,001$)

Figura 10: Comparación de los rangos cuartiles de dosis equivalente anual para área industrial y médica.



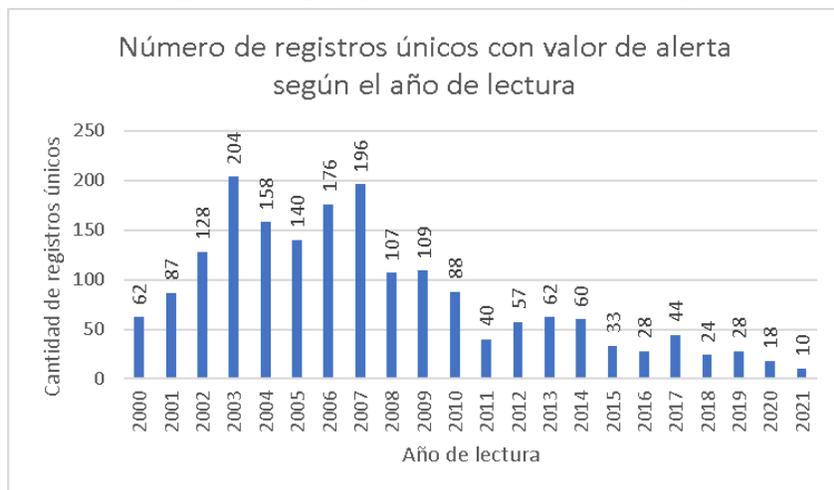
Se realiza la prueba estadística de comparación U Mann Whitney entre los valores de dosis equivalente anual <20 mSv de las categorías área de trabajo “uso médico” y “uso industrial”. El resultado de esta prueba estadística determina que la hipótesis nula “la distribución de los valores de dosis equivalente anual entre la categoría uso industrial y uso médico son iguales” es rechazada ($z= 3,230$ $p=0,0012$). De ambas pruebas estadísticas se concluye que al menos la distribución de la dosis equivalente anual <20 mSv entre las categorías “uso médico” y “uso industrial” son de forma estadísticamente significativamente diferentes.

Valores de Alerta.

Se encuentra una cantidad de 1859 registros con valor de lectura Hp(10) mayor o igual a 5 mSv. Además, se observa que 167 de estos registros se encuentran duplicados debido a una categorización del área de trabajo del trabajador con más de una categoría. En la Figura 9 podemos ver la distribución de registros con valor de lectura Hp(10) mayor o igual a 5 mSv respecto al año de lectura sin tener en consideración el área de trabajo. En

este podemos observar que el año con una frecuencia más alta es el año 2003 con 204 dosímetros y una frecuencia más baja el año 2021 con 10 dosímetros. Cabe mencionar, que el año 2009 se realiza el ordinario que determina el concepto “dosis significativa” a los 5 mSv, lo que puede tener alguna relación con la disminución de los valores de alerta cercanos a este año.

Figura 11: Número de registros Hp(10) con valor de alerta según año.



Para relacionar la categorización de área de trabajo y los valores de alerta se muestra la Tabla 9 para observar la cantidad de valores de alerta que posee cada área de trabajo en el periodo de estudio. En esta tabla se observa que la categoría de área de trabajo con mayor cantidad de valores de alerta es “sin información” seguida de “uso industrial”. Esto mismo ocurre al analizar la dosis equivalente anual no $MNR \geq 20$ mSv.

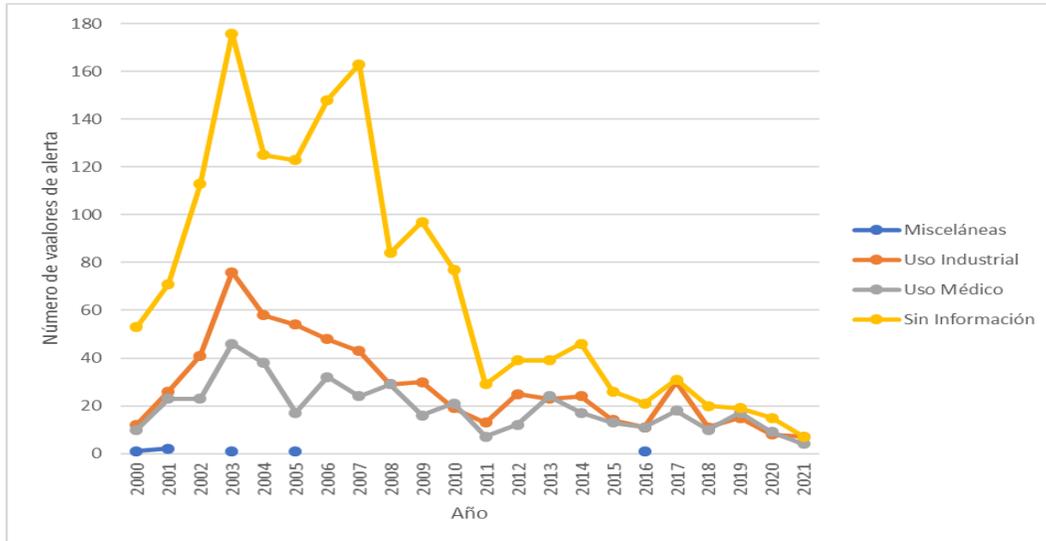
Tabla 9: Valores de alerta Hp(10) y dosis equivalente anual >20 mSv por categorización del área de trabajo.

| Categorización del área de trabajo | Frecuencia* trimestral | Frecuencia* Dosis equivalente Hp(10) \geq 5 mSv | Frecuencia* anual | Frecuencia* "Dosis equivalente anual" \geq 20 mSv |
|------------------------------------|------------------------|---|-------------------|---|
| Misceláneas | 4038 | 6 | 1420 | 2 |
| Sin información | 250555 | 1521 | 78460 | 360 |
| Uso Industrial | 41361 | 299 | 12504 | 174 |
| Uso Médico | 112055 | 200 | 26065 | 140 |
| Total general | 408009 | 2026 | 118449 | 676 |

*Se consideran trabajadores con más de una categorización de área en todas las áreas de trabajo que le corresponda.

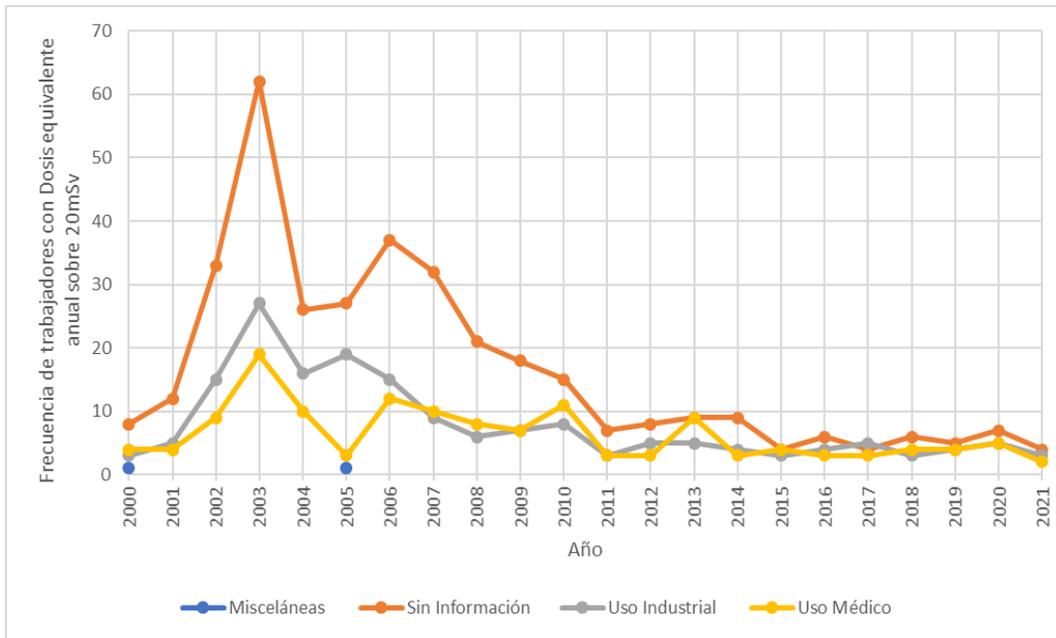
La Figura 12 observa la distribución anual de la frecuencia de valores de alerta categorizados por área de trabajo. En esta se ve que la categoría "sin información" posee la mayor cantidad de valores de alerta a lo largo de todos los años, con las categorías "uso industrial" y "uso médico" fluctuando en el tiempo.

Figura 12: Valores de alerta entre 2000-2021 por área de trabajo.



En la figura 13 se observa la distribución anual de valores de dosis equivalente anual mayor o igual al límite anual de 20 mSv por categoría de área de trabajo. Se observa que existe tempranamente una mayor cantidad de trabajadores con dosis mayor o igual 20 mSv en la categoría “sin información” y luego “uso industrial”, mientras que en los últimos años la diferencia en frecuencia entre las diferentes categorías de “uso médico”, “uso industrial” y “sin información” está disminuida.

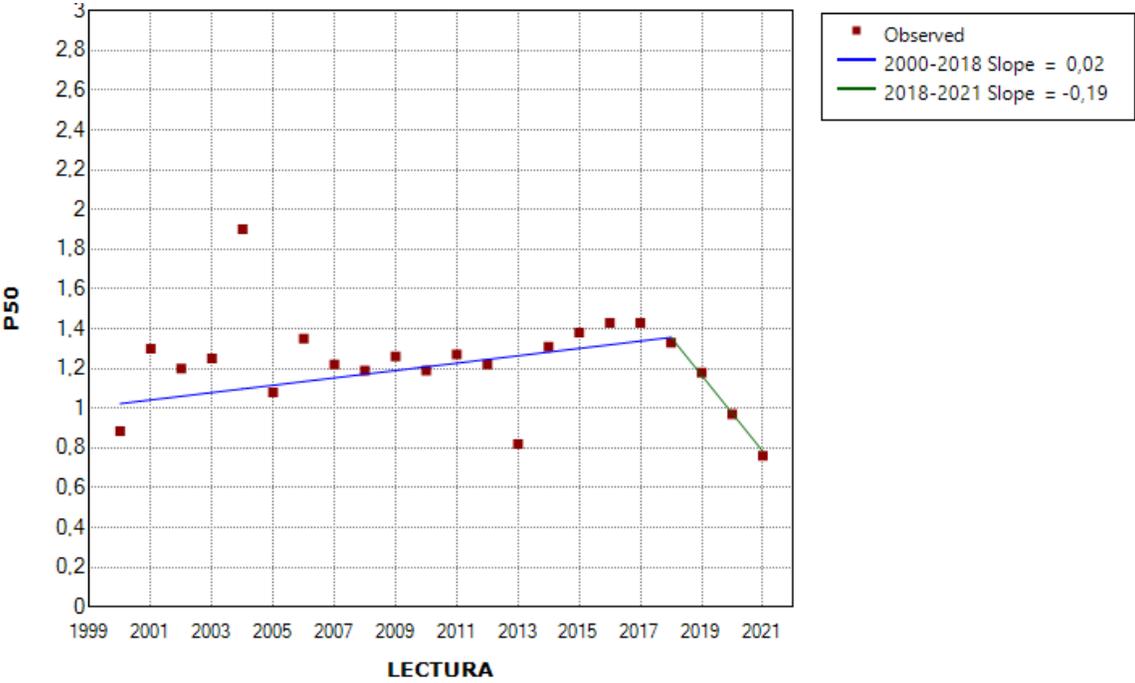
Figura 13: Número de trabajadores sobre el límite anual de 20 mSv entre el año 2000 a 2021 por categorización de trabajo.



Tendencia de la dosis equivalente anual

Para analizar la tendencia, se ocupa la medida de la mediana de la dosis equivalente anual, debido al comportamiento no paramétrico de la dosis equivalente anual. Para esto se utilizó el software de regresión joinpoint, en donde este software identificó 1 punto de quiebre importante en el tiempo de estudio: 2000-2018 y 2018-2021 con una pendiente de 0,02 y -0,19 respectivamente. Este análisis se muestra en la figura 12.

Figura 14: Tendencia de la dosis equivalente anual entre los años 2000 y 2021.



6. Discusión.

Previo a realizar un análisis de lleno en los resultados, hay que tener en consideración diferentes aspectos de la metodología como el origen de la muestra, data aberrante y las variables usadas en la investigación, debido a que no es fácilmente extrapolable la información de solo un laboratorio de dosimetría personal externa, como lo es la información otorgada por la base de datos de la CCHEN a un nivel nacional. Esto es debido a que el servicio de dosimetría externa de la CCHEN depende de un elemento mercantil, entre otros factores, por lo que podría modificar el perfil y el número de los clientes que están siendo analizados en este estudio.

Por otra parte, en el estudio se utiliza la dosis equivalente Hp(10) en lugar de la dosis efectiva. El valor de la Hp(10) está sujeto a las suposiciones realizadas, los detalles de la calibración, la metodología de lectura y la forma de cálculo, por lo que podría diferir en mayor o menor medida de la dosis efectiva (se hace hincapié en que la Hp(10) es una magnitud operacional a diferencia de la dosis efectiva que es una magnitud de protección), pero juntando los factores de buena posición del dosímetro en el cuerpo, exposición a dosis bajas y asumiendo una exposición uniforme, el valor Hp(10) representa una dosis efectiva precisa (3). En el documento del ISP año 2021 “ESTIMACIÓN DE MAGNITUDES DE PROTECCIÓN PARA IRRADIACIÓN EXTERNA A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE MAGNITUDES OPERACIONALES EN EL CAMPO DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA OCUPACIONAL” se describe que *“al menos en los rangos energéticos más comunes de hallar, para las exposiciones ocupacionales en el país, siempre estas magnitudes operacionales sobreestiman la Dosis Efectiva”* (29). Es de esperar, por lo tanto, que al realizar una comparación con otros estudios que ocupen la variable dosis efectiva, nuestro estudio realice una sobrestimación de la dosis que hay que tener en consideración.

Por otro lado, la decisión de excluir los registros con un valor de dosis $H_p(10) < 0,1$ mSv también contribuye a la dificultad de comparación de este estudio con otros artículos. La definición del concepto de nivel de registro coincide sólo parcialmente con lo reportado en otros países. Por ejemplo, en Canadá (30) el valor de dosis "0" depende del laboratorio proveedor de dosimetría, con un rango descrito entre 0.01 a 0.1 mSv o en España (31), donde el nivel de registro demarcado por el Consejo de seguridad nuclear es 0,1 mSv/mes.

Al analizar la distribución de los dosímetros, tenemos que mencionar que a medida que ha pasado el tiempo también se han agregado nuevos laboratorios dosimétricos que han competido por el mercado de dosimetría externa. Por lo tanto, a principios de los años 2000 es probable que la muestra observada sea más representativa de la realidad nacional en comparación con la muestra obtenida en el año 2021. El efecto del mercado en la muestra se puede observar, por ejemplo, en la disminución de dosímetros leídos a partir del año 2017. Por otro lado, se observa que el año 2011 existe una caída de dosímetros leídos en comparación con el resto de los años reflejado en la disminución de trabajadores anuales observados en la Tabla 6. La caída de la dosis equivalente colectiva en el 2011 (ver Figura 4), se podría explicar en parte a la reducción en el número de dosímetros analizados ese año. La baja de dosímetros leídos puede tener relación con alguna circunstancia interna del laboratorio que redujo la oferta del servicio en ese momento o por pérdida de información por parte del servicio de dosimetría personal externa. Junto con lo mencionado anteriormente, en la Figura 3 se debería esperar un cambio lento de la mediana y rango intercuartil; sin embargo, existen cambios notorios en los años 2004 y 2013, por lo que, es posible que exista algún factor no incluido en este estudio que pueda explicar este fenómeno como la adición de un cliente en particular que modifique el perfil de la muestra, problemas en los equipos utilizados, cambios en las metodologías, entre otros.

A pesar de lo anteriormente expuesto y de acuerdo a los resultados de este estudio, podemos observar que se obtiene una mediana de 40 años (35 para sexo masculino y 37 para femenino). Como punto de comparación se encontraron escasas publicaciones o reportes; sin embargo, uno de ellos es el RND de Canadá en donde en el año 2018 se reporta una mediana de 39 años (28), en un análisis del registro de dosis nacional de Corea que data desde 1984 a 1999, la mediana encontrada está en el rango de 30-39 años (32) y en Reino Unido la información dada por el Central Index of Dose Information del año 2004, da una mediana para los hombres y mujeres en el rango de 40-45 años y 35-40 años respectivamente (33). Por otra parte, al realizar un análisis de la prueba estadística de correlación de Spearman entre las variables dosis equivalente anual y edad ($\rho=0,0850$ $p=0,0001$), se observa una dependencia muy baja de las variables. Por lo tanto, es probable que otros factores tengan relación y que expliquen de mejor manera esta dependencia, lo que podría ser abordado en una futura investigación. Al realizar una búsqueda internacional, no se encuentra bibliografía asociada a la evaluación de la correlación entre edad y dosis equivalente anual; sin embargo, en Corea (1999) se observa una disminución de la dosis equivalente anual al aumentar los rangos de edad que contrasta al coeficiente de Spearman (32).

En cuanto a la distribución observada de los sexos masculino y femenino en los trabajadores ocupacionalmente expuestos, en nuestro estudio se observa que del registro o trabajadores en el periodo de tiempo considerado y con categorización válida, 28.439 (42,82%) corresponden a la categorización "F", de femenino y 37.969 (57,17%) corresponden a la categorización de "M" de masculino. Por lo apreciado en la experiencia de otros países, el RND de Canadá en el periodo de 2008-2018 registró un 59,46% de sus trabajadores como femenino y 40,54% como masculino (30), mientras que en un periodo más remoto entre 1984 al 1999 en Corea del Sur, se reportó que el 90,1% corresponde a hombres y el 0,9% a mujeres (32), asemejándose más a la realidad de

Chile a inicios de la década de los 2.000, en donde alrededor del 85% de los trabajadores correspondían a hombres. En cuanto a la dosis según el sexo, existe escasa bibliografía que haga una diferenciación por este criterio; sin embargo, la publicación coreana establece la dosis media equivalente anual para hombres de 1,49 mSv y 0,56 mSv para mujeres (32) y el reporte del 2004 del Reino Unido indica una dosis efectiva promedio anual de 0,4 mSv para ambos géneros (33), en contraste con los 1,43mSv para mujeres y 1,61mSv para hombres observado en este estudio.

Se observa una mayor dosis equivalente anual en el área industrial que en el área médica representados por la mediana (1,3 y 1,21 mSv). En las siguientes publicaciones internacionales, se observa una concordancia al reportar una mayor dosis en el área industrial en comparación al área médica:

- 1) Canadá 2018 (Dosis efectiva promedio anual no-cero Industrial: 0,9 mSv - Médica: 0,65 mSv) (30).
- 2) España 2016 (Dosis efectiva promedio anual Industrial:1,05 mSv Médica: 0,53 mSv) (30).
- 3) Francia 2020 (Dosis efectiva promedio anual Industrial no nuclear: 0,93 mSv Actividad médica y veterinaria: 0,25 mSv) (35)
- 4) Irlanda entre 2000 a 2005 (Dosis equivalente promedio anual Industrial: 0.79 mSv Médica: 0,32 mSv) (36).

Al contrario, en las publicaciones de Corea entre 1984 a 1999 (dosis equivalente anual promedio Industrial: 0,83 mSv Médico: 1,06 mSv) (32), Holanda entre 2015 y 2020 (35) y China entre 2009 a 2018 (38), se observa una mayor dosis en los establecimientos del área médica que en el área industrial. Por lo tanto, debe existir algún factor que modifique el perfil de estas áreas de trabajo entre países cómo la cultura de protección radiológica inculcada a nivel país, tecnología de protección radiológica utilizada u otro.

Un elemento de interés respecto al estado de las bases de datos de los laboratorios de dosimetría, es observar cómo la retroalimentación en los casos de valores de alerta puede modificar el perfil de lecturas dosimétricas. Por ejemplo, en el caso de las dosis extremas mayores a 100 mSv, en el documento del ISP año 2014 “PERFIL DE LA EXPOSICIÓN OCUPACIONAL A RADIACIONES IONIZANTES EN CHILE” que analiza los valores de lectura dosimétricos entre el segundo trimestre del año 2007 y el tercer trimestre de 2014, se menciona que *“el conjunto de valores de dosis trimestrales medidas con valores superiores a 100 mSv se ha podido determinar que todos ellos no corresponden efectivamente a irradiaciones de trabajadores”* (39). Si extrapolamos esta información, se encontraría que en nuestro estudio se observan 27 dosis Hp(10) >100 mSv entre los años 2000 a 2021 y 12 entre los años 2007 a 2014, que según el reporte la mayor parte no corresponden a irradiaciones efectivas del trabajador, sino a exposiciones accidentales donde solo el dosímetro fue expuesto a radiación

En el mismo documento mencionado anteriormente, se describe que un porcentaje de 0,05% de las dosis trimestrales dan unos valores de alerta (mayor o igual a 5 mSv) y un porcentaje de 0,02% de las dosis trimestrales alcanzarían el valor de 12,5 mSv (39). En nuestro estudio, por otro lado, se obtuvieron un 0,5% de valores de alerta (1859 valores de alerta en 369.322 dosímetros) y un 0,135% de dosis que alcanzarían 12,5 mSv (498 dosis de 369.322 dosímetros). Este aumento de los valores de límite secundarios podría estar relacionado con la sobrestimación de la dosis operacional en comparación a la dosis efectiva, al mayor rango de años en consideración para el estudio, en donde en el periodo comprendido entre 2000 y 2010 existen más valores de alerta, al perfil de los trabajadores registrados en la base de datos u otro elemento que no ha sido tomado en consideración en este estudio.

Para finalizar, queremos destacar los avances en términos de protección radiológica que se podrían observar durante los años, en dónde ha existido un aumento en la cantidad de

trabajadores que han sido vigilados dosimétricamente hasta el 2016, lo que nos permitiría observar el manejo de las políticas públicas para regularizar la vigilancia de la radiación ionizante y/o el posible incremento en el número de trabajadores que se desempeñan en labores en que se usa radiación ionizante, además de la disminución de los valores de alerta que se han visto que probablemente tengan relación con el concepto de dosis significativa incluida el año 2009. También se observa en los últimos años mejoras respecto a la disminución del rango intercuartil y a la tendencia a disminuir de la dosis equivalente anual representada por la mediana desde el año 2018 lo que da buenos indicadores respecto a las mejoras de la cultura de protección radiológica, gracias a las políticas de promoción y aseguramiento de protección de las últimas décadas, en el conjunto de instituciones que realiza dosimetría externa en el laboratorio de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

7. Conclusión.

Debido al aumento de la utilización de las radiaciones ionizante en las últimas décadas, se hace imprescindible la investigación de la vigilancia dosimétrica personal en los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE) para promover los objetivos de la protección radiológica. La sección de vigilancia radiológica del servicio de dosimetría externa de la CCHEN, realiza dosimetría externa para clientes desde 1974 y no habían realizado un análisis estadístico anteriormente, por lo que, este estudio representa una posibilidad de mejora y les permite tener un estado actual de su base de datos, lo que es reflejo de su desempeño como laboratorio y del estado actual de la exposición ocupacional de sus clientes.

En base al estudio del estado de la base de datos proporcionada por el Servicio de dosimetría personal externa de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, se recomiendan mejoras en cuanto a la adquisición de información epidemiológica y en el sistema de categorización del área de trabajo de los TOE, incluyendo una valoración por profesión ejercida y subárea de trabajo como, por ejemplo, medicina nuclear, radioterapia, gammagrafía, sub-áreas industriales, entre otros. Esto con la finalidad de reducir las inconsistencias de la base con las se tuvo que lidiar en este trabajo y que hayan podido influir en los resultados e información recolectada, como la falta de información en categorías como área de trabajo y sexo o la duplicidad de información. Con el objetivo de que futuros estudios incorporen esta buena manera esta data, realicen un análisis más detallado y profundo sobre la realidad del uso de las radiaciones de los clientes que adquieren el servicio de dosimetría externa.

Luego de la exclusión de las entradas menores al nivel de registro, se observa una cantidad de 369.322 registros, lo que corresponden a 109.302 trabajadores vistos de

forma anual, con una mediana de 40 años. De los registros con información de sexo, se encuentra una proporción de 42,8% femenino y un 57,2% masculino. En cuanto a la información dosimétrica se obtiene una mediana de dosis Hp(10) de 0,32 mSv (P25=0,19 mSv y P75=0,53 mSv) y una mediana de la dosis equivalente anual de 1,21 mSv (IC: P25=0,71 mSv y P75=1,9 mSv). Se observó una mayor dosis equivalente anual en hombres ($p < 0,05$), con una mediana de 1,19 mSv en comparación con la mediana de mujeres de 1,12 mSv. Se reportó que los trabajadores del área industrial poseen mayor frecuencia de valores de alerta y una mayor dosis equivalente anual que los trabajadores del área médica (1,3 y 1,21 mSv respectivamente). Se observa una tendencia a la disminución de la mediana de la dosis equivalente anual desde el 2018 (Pendiente 2000-2018: 0,02 - 2018-2021: -0,19) en conjunto a la disminución en la frecuencia de valores de alerta en la última década, posiblemente debido a la mayor fiscalización por las autoridades gubernamentales y a un avance e inversión en tecnologías y técnicas de protección radiológica.

Se observan mejoras en términos de protección radiológica, en donde vemos un aumento de trabajadores vigilados dosimétricamente hasta el año 2016, parte de esto lo atribuimos a la regularización de los trabajadores no vigilados anteriormente, disminución en la frecuencia de valores de alerta en la última década y una tendencia a la disminución de la mediana de la dosis equivalente anual desde 2018.

A partir de este estudio, se espera fomentar la realización de nuevas publicaciones o estudios a nivel nacional, ya sea por otros laboratorios de dosimetría externa o el ISP, respecto a la información de los trabajadores ocupacionalmente expuestos considerando variables que este estudio y el servicio de dosimetría de la CCHEN no consideran y que puedan ser importantes para la descripción más minuciosa y detallada sobre la realidad de los trabajadores expuestos en Chile.

8. Bibliografía

1. Organismo Internacional de Energía Atómica. 2019, Advisory Mission on Regulatory Infraestructura for Radiation Safety Guidelines, IAEA Services Series 38, 11 p.
2. International Atomic Energy Agency, 2019, FUNCTIONS AND PROCESSES OF THE REGULATORY BODY FOR SAFETY INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Safety Standards Series No. GSG-13, 9 p.
3. Comisión Internacional de Protección Radiológica, 2007, The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP.
4. Comisión Internacional de Protección Radiológica, 2008, Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108, Annals of the ICRP.
5. Comisión Internacional de Protección Radiológica, 2007, Radiological protection in medicine, ICRP Publication 105, Annals of the ICRP.
6. Consejo de Seguridad Nuclear, 2002, Uso de las radiaciones, Csn.es [Internet], Disponible en: <https://www.csn.es/usos-de-las-radiaciones> [citado el 4 de Enero 2022]
7. DECRETO 3 APRUEBA REGLAMENTO DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DE INSTALACIONES RADIOACTIVAS, Santiago, Chile, 1985.
8. DECRETO 133 APRUEBA REGLAMENTO SOBRE AUTORIZACIONES PARA INSTALACIONES RADIATIVAS O EQUIPOS GENERADORES DE RADIACIONES IONIZANTES, PERSONAL QUE SE DESEMPEÑA EN ELLAS, U

OPERE TALES EQUIPOS Y OTRAS ACTIVIDADES AFINES. Santiago, Chile.;
1984.

9. Instituto de Salud Pública, 2020, Servicios de dosimetría personal externa (SPDE) habilitados por el ministerio de salud. [Internet]. Ispch.cl. [citado el 6 enero 2022]. Disponible en:
<http://www.ispch.cl/sites/default/files/Listado%20Servicios%20de%20Dosimetr%C3%ADa%20Personal%20Externa%20SDPE%20-%20MAY%202020.pdf>
10. Instituto de Salud Pública, 2021 Informe Vigilancia Radiológica Personal Ocupacional Radiaciones Ionizantes 2007 – septiembre 2021 [Internet]. Disponible en:
https://www.ispch.cl/wp-content/uploads/2021/12/Radiaciones-ionizantes-_09-11-2021_v1-1-2.pdf
11. Comisión Internacional de Protección Radiológica, 1990, The 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP.
12. Comisión Internacional de Protección Radiológica, 2012, ICRP statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
13. Comisión Chilena de Energía Nuclear, 2018, CRITERIOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, NORMA DE SEGURIDAD NS-02.0.
14. Directora Instituto de Salud Pública de Chile, 2009, Ord. 782 Notificación al Instituto de Salud Pública de dosis significativas.
15. Directora Instituto de Salud Pública de Chile, 2010, Ord.1893 Propone uso de la magnitud Hp(10) para la vigilancia individual.

16. Comisión Chilena de Energía Nuclear, Compromisos Internacionales [Internet]. Portalregulador.cchen.cl. [cited 4 January 2022]. Disponible en: <https://portalregulador.cchen.cl/CompromisosInternacionales>
17. Ministerio de relaciones exteriores, Gobierno de Chile, Chile M. Temas y comisiones - Chile en el Exterior [Internet]. Chile en el Exterior. [citado el 4 January 2022]. Disponible en: <https://chile.gob.cl/onu-en-viena/sobre-la-mision/temas-y-comisiones>
18. International Atomic Energy Agency, 2018, INTEGRATED REGULATORY REVIEW SERVICE (IRRS) MISSION TO CHILE [Internet]. 72-78p. Disponible en: https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/review-missions/irrs_chile_final_report.pdf
19. International Atomic Energy Agency, Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria (IRRS) [Internet]. laea.org. [citado el 6 enero 2022]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/servicios/servicio-integrado-de-examen-de-la-situacion-reglamentaria-irrs>
20. Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas, 2020, ICRU report 95. Operational Quantities for External Radiation Exposure, Journal of the ICRU, 24-29p.
21. Allisy, A., Jennings, W. A., Kellerer, A. M., & Müller, J. W. (1993). Part I Quantities and Units for Measurement and Calculation in Radiation Protection. Reports of the International Commission on Radiation Units and Measurements, os-26(2), 3–8p.
22. International Atomic Energy Agency, 2018, Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7.
23. International Atomic Energy Agency, 2019, National Dose Registry - a central point for occupational dose records | IAEA [Internet]. laea.org. [citado el 4 enero 2022]. Disponible en:

<https://www.iaea.org/resources/webinar/national-dose-registry-a-central-point-for-occupational-dose-records>

24. Flores Tapia, Carlos Ernesto; Flores Cevallos, Karla Lissee, 2021, PRUEBAS PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE DATOS EN PROCESOS PRODUCTIVOS: ANDERSON-DARLING, RYAN-JOINER, SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV, Societas. Revista de Ciencias Sociales y Humanísticas, vol. 23.
25. Nachar, Nadim, 2008, The Mann-Whitney U: A Test for Assessing Whether Two Independent Samples Come from the Same Distribution Tutorials in Quantitative Methods for Psychology, Tutorials in Quantitative Methods for Psychology, vol.4, página 13-20.
26. Ostertagova Eva, Ostertag Oskar, Kováč Jozef, 2014, Methodology and Application of the Kruskal-Wallis Test, Applied Mechanics and Materials, Vol:611, páginas 115-120.
27. Pirie, W. (2006). *Spearman Rank Correlation Coefficient. Encyclopedia of Statistical Sciences.*
28. Kim HJ, Fay MP, Feuer EJ, Midthune DN, 2000, "Permutation Tests for Joinpoint Regression with Applications to Cancer Rates", Stat Med 2001,20,655.
29. Leyton Alfonso, (2021), ESTIMACIÓN DE MAGNITUDES DE PROTECCIÓN PARA IRRADIACIÓN EXTERNA A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE MAGNITUDES OPERACIONALES EN EL CAMPO DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA OCUPACIONAL, Departamento de salud ocupacional.
30. Health Canada, (2021), REPORT ON OCCUPATIONAL RADIATION EXPOSURES IN CANADA 2008–2018.
31. Consejo de seguridad nuclear, Sociedad Española de Protección Radiológica Sociedad Española de Física Médica, (2009), PROTOCOLO PARA LA

VIGILANCIA DOSIMÉTRICA MEDIANTE DOSIMETRÍA DE ÁREA DE LOS TRABAJADORES EXPUESTOS CLASIFICADOS COMO CATEGORÍA B EN EL ÁMBITO SANITARIO, FORO SOBRE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN EL MEDIO SANITARIO.

32. Choi, S.Y.; Kim, T.H.; Chung, C.K.; Cho, C.K.; Paik, N.S. (2001). *Analysis of Radiation Workers' Dose Records in the Korean National Dose Registry. Radiation Protection Dosimetry*, 95(2), 143–148.
33. HSE Central Index of Dose Information, (2017), Summary of Statistics for 2004 [Página web] Disponible en <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20170717163305/http://www.hse.gov.uk/radiation/ionising/doses/dose2004.htm>
34. Consejo de seguridad nuclear, (2016), Datos dosimétricos de los trabajadores año 2016.
35. Institut de radioprotection et sûreté nucléaire, (2020) Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France: bilan 2020.
36. Colgan, P. A.; Currivan, L.; Fenton, D. (2007). *An assessment of annual whole-body occupational radiation exposure in Ireland (1996-2005). Radiation Protection Dosimetry*, 128(1), 12–20.
37. G. de With, Nationaal Dosis Registratie- en Informatie Systeem, (2021), NDRIS jaarrapportage 2020.
38. Deng J, Fan S, Wang T, Li M, Guo W, Sun Q, (2020), NATIONAL DOSE REGISTRY AND TRENDS OF OCCUPATIONAL EXPOSURE TO IONISING RADIATION IN CHINA (2009-2018). *Radiat Prot Dosimetry*. ;191(3):376-381.
39. Otto Delgado R., Alfonso Espinoza L., Oscar Edding M., Lorena Ponce P, (2014), PERFIL DE LA EXPOSICIÓN OCUPACIONAL A RADIACIONES IONIZANTES EN CHILE.

9. Anexos

Anexo 1: Especificaciones técnicas dosímetros PD1, PD3, PD5 y PD8

Dosímetro PD1

El detector PD1, es un dispositivo basado en la tecnología film ya discontinuado hace más de una década, sin embargo, por lo general se describe una sensibilidad de las películas de 0,20 mSv a 50 mSv.

Dosímetros PD3, PD5 y PD8

Tipo cristal: fluoruro de litio, dopado con magnesio y titanio (LiF: Mg,Ti)

Carcasa: Compuesto de plástico ABS de alta densidad (44x17x10 mm) con espacio para alojar 2 cristales termoluminiscentes.

Espectros de energía detectados: sensibilidad es estable a fotones de energías desde 20 keV hasta 10 MeV.

Rango de dosis registrable: 0,05 mSv hasta 1000 mSv con incerteza global (desviación estándar) inferior al 20% para rayos X o gamma.

Dispositivos de lectura:

- PD3: equipo Harshaw 5500
- PD5: equipo Harshaw 6600
- PD8: equipo RadPro.

Por lo general, la sensibilidad para los cristales TL conformados con LiF:Mg,Ti: es de 100 μ Sv- 5 Sv.

Anexo 2: Tabla Resumen de la depuración de datos.

| Información | Cantidad de registros |
|--|-----------------------|
| Data total inicial | 837.595 |
| Registros completamente duplicados | 138.886 |
| Registros dosímetro tipo A | 49.683 |
| Registros dosímetro tipo C | 1.139 |
| Registros con data duplicada exceptuando información cliente | 221.043 |
| Registros formato de fecha de lectura erróneo | 1 |
| Registros totales incluyendo diferencias en área de trabajo | 426.844 |
| Registros totales excluyendo diferencias en área de trabajo | 386.430 |

Anexo 3: Campos originales de la base de datos

| | |
|----------------------------------|--|
| Fecha dosímetro | Campo número entero, corresponde a la fecha de entrega del dosímetro al trabajador ocupacionalmente expuesto. |
| Fecha dosis | Campo número entero, corresponde a la fecha de lectura del dosímetro. |
| Código identificador de Cliente | Campo número entero, corresponde a un número designado al cliente que contrata el servicio de dosimetría para el TOE. |
| Área de trabajo | Campo de texto, corresponde a la categorización de área de trabajo, posee 4 opciones: Médica, industrial, miscelánea o Sin información, este campo está ligado al código identificador de cliente. |
| Código de identificación del TOE | Campo número entero, corresponde a un número designado por TOE independiente del tiempo de información. |
| Fecha de nacimiento TOE | Campo número entero, corresponde a la fecha de nacimiento del TOE. |
| Sexo del TOE | Campo de texto, corresponde a una variable que determina el sexo del trabajador, se considera el campo válido un contenido F, M o vacío. |
| Tipo de dosímetro | Campo alfanumérico, corresponde al tipo de dosímetro utilizado, tiene como opciones: PD1, PD3, PD5, PD8, A o C.. |
| Código de dosímetro | Campo número entero, corresponde a un número identificador designado al dosímetro. |
| Dosis Hp(10) [mSv] | Campo número, corresponde a la dosis de lectura Hp(10) en mSv. |
| Código de dosis | Campo número entero, corresponde a un número identificador resignado al registro de lectura. |

Anexo 4: Campos de variables derivadas de las obtenidas de la base de datos

| | |
|-------------------------|---|
| Edad | Campo número, corresponde a la sustracción del año de nacimiento del POE al año de lectura. |
| MNR | Campo alfanumérico, corresponde a la categorización del valor del campo "Dosis Hp(10)", tal que, si es menor a 0,1 mSv es igual a "MNR" (menor al nivel de registro), en el otro caso es igual a "Vacío". |
| Valor de Alerta | Campo alfanumérico, corresponde a la categorización del valor del campo "Dosis Hp(10)", tal que, si es mayor o igual 5mSv es igual a "Valor de Alerta", en el otro caso es igual a "Vacío". |
| Dosis equivalente anual | Campo numérico, corresponde a la suma de todos los registros del campo Dosis Hp(10) mayor o igual a 0,1 mSv que coincidan en la combinación de los campos "Año de lectura" y "Código de identificación del TOE" |
| Dosis colectiva no MNR | Campo numérico, corresponde a la suma de todos los registros del campo Hp(10) mayor o igual a 0,1 mSv en el periodo estipulado. |