
Análisis de datos de la protección radiológica individual en un centro de radioterapia, basados en la información del dosímetro personal de los trabajadores ocupacionalmente expuestos

Elvia Odalis Reyes Guevara



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Análisis de datos de la protección radiológica
individual en un centro de radioterapia, basados en
la información del dosímetro personal de los
trabajadores ocupacionalmente expuestos**

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por
Elvia Odalis Reyes Guevara
para optar al grado académico de Licenciada en Física

Guatemala,
2020

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades

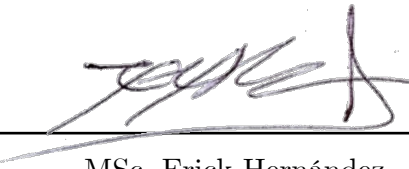


Análisis de datos de la protección radiológica individual en un centro de radioterapia, basados en la información del dosímetro personal de los trabajadores ocupacionalmente expuestos

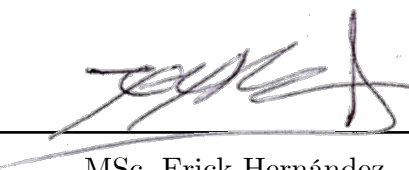
Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por
Elvia Odalis Reyes Guevara
para optar al grado académico de Licenciada en Física

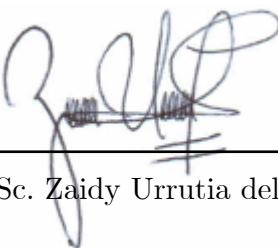
Guatemala,
2020

Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Erick Hernández

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Erick Hernández

(f) 
MSc. Zaidy Urrutia del Cid

(f) 
Licda. Ana Diéguez

Fecha de aprobación: Guatemala, 11 de diciembre de 2020.

Cuando era niña, recuerdo que mi maestra nos dio instrucciones de buscar una lectura corta dentro del libro de texto. Abrí mi libro y me topé con la imagen de una aurora boreal; recuerdo haber quedado asombrada ante tal fotografía, y me pregunté cómo es que tal maravilla se podía observar a simple vista. Ese día, llegué a mi casa y *googleé* sobre el fenómeno. Leí y, como era de esperarse, no entendí sobre el tema hasta que entré a los básicos. En esos años, recuerdo haber leído un ensayo sobre las mujeres en la ciencia, cuyas palabras finales eran

«Así que tranquila, amiga mía, que las estrellas algún día serán tuyas»

Quedé perpleja ante tales palabras, y por alguna razón, sentí que el destino me llamaba. Es por eso que decidí estudiar física, porque quería aprender sobre el Universo y saber sobre sus misterios; quería ser como Stephen Hawking, quería publicar mis descubrimientos y aportar algo a la ciencia. Sin embargo, como todo en la vida, siempre existe una situación que nos causa un bajón emocional.

En mi último año de colegio, a mi papá le detectaron cáncer. Él estaba entre la vida y la muerte; pasó por un proceso largo de quimioterapias y cirugías. Aún estando en mi segundo año de universidad, él se encontraba en una condición poco estable. En esos momentos, perdí la motivación de mis estudios porque no podía hacer nada para ayudarlo. Me sentía enojada con mi carrera, porque en ese entonces, no sabía que existía algo que pudiese ayudarlo. Sin embargo, a finales de mi tercer año de universidad, se me presentó la oportunidad de realizar mis prácticas en el área de Física Médica. No sabía qué se hacía allí exactamente, y mucho menos sabía el impacto que tenía en la sociedad. Así que decidí darle una oportunidad para ver qué podía pasar.

A pocas semanas de graduarme, puedo decir que encontré esa motivación. Saber que puedo aportar algo, aunque sea un granito de arena para la protección radiológica de Guatemala, me llena de mucha satisfacción. Este trabajo va para mi papá, y para todas las personas que alguna vez fueron, o son, víctimas del cáncer. Este trabajo también va para el personal médico; pronto me les uniré.

«Y sin embargo, cada hombre mata lo que ama.
Que todos oigan esto,
unos lo hacen con una mirada torva,
otros con la palabra halagadora;
el cobarde lo hace con un beso,
con la espada el valiente.»

OSCAR WILDE, *La balada de la cárcel de Reading*

Agradecimientos

A mis papás, Héctor y Elvia, por sus esfuerzos y sacrificios, porque gracias a ellos estoy donde estoy. Les dedico todos mis triunfos, reconocimientos y éxitos. Espero pueda seguir compartiendo momentos alegres, locuras, aventuras y risas con ellos.

A mi mejor amiga, Maryandré, porque desde hace 10 años, siempre creyó en mí y me dio ánimos cuando más lo necesité. Si me preguntasen si creo en las almas gemelas, firmemente diría que sí y diría que ella es la mía. Amistad como la de ella, se encuentra una vez en la vida (si es que se cuenta con suerte). Le deseo toda la felicidad del mundo, porque lo merece.

A mi otra mitad, Ivan, por enseñarme a ver lo bonita que es la vida y por motivarme a ser mejor persona. Espero él pueda encontrar su verdadera pasión y ser feliz estudiando lo que sea que quiera estudiar, porque no hay nada más que me llene de alegría al saber que él cumplió su sueño.

A Mayra, por las innumerables risas y buenos momentos. Gracias a ella, aprendí mucho sobre mí; es la persona más increíble y dedicada que conozco, digna de admirar y de aplaudir. A mis compañeros de carrera, por compartir risas, lágrimas y enojos en el salón de clase. Cuatro años atravesando una odisea juntos, siendo conejillos de india de la carrera. No dudo en que van a triunfar en lo que sea que se propongan.

A mi asesor, Erick, por tomarse el tiempo de corregir este trabajo y por ayudarme a crecer académicamente y profesionalmente; por abrirme las puertas en la clínica y ofrecerme un lugar para ayudarlo. También agradezco a mi directora de carrera, Zaidy, por ser el pilar del departamento y por su eterno apoyo.

A todos mis profesores de carrera, especialmente a Irene, porque gracias a ella mejoré como estudiante y encontré nuevamente la motivación de continuar con la carrera. A Siba, por hacer de mis últimos semestres los más alegres y divertidos con sus historias. A Dorval, porque a pesar de compartir solo un semestre en su salón de clase, él vio algo en mí que yo jamás en mis 21 años hubiera visto. Gracias por enseñarme a ver lo bella que es la matemática (y a casi cambiarme de carrera, por cierto).

A las demás personas que forman y/o formaron parte del departamento, en especial a Olguita, por su increíble paciencia. A don Byron, por siempre apoyarme en los laboratorios de física y su eterna disposición en brindarme la mejor atención posible.

A José Bagur, por darme la oportunidad de ser parte del equipo del CubeSat y por brindarme la amistad más genuina en mis años de carrera. A Francisco Molina, por ser la persona más genial de este mundo. Y al resto de mi familia, espero este trabajo los enorgullezca.

Prefacio	IV
Agradecimientos	IV
Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	IX
Resumen	X
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. Justificación	3
4. Marco teórico	4
4.1. Radiación	4
4.2. Rayos X	5
4.2.1. Uso en la medicina	6
4.2.2. Beneficios al paciente	6
4.2.3. Daños y riesgos para el trabajador	7
4.3. Ley de protección radiológica en Guatemala	7
4.3.1. Capítulo I: Disposiciones generales	7
4.3.2. Capítulo II: Competencia	7
4.3.3. Capítulo III: De las inspecciones	8
4.3.4. Capítulo IV: De las licencias	8
4.3.5. Capítulo V: Del desplazamiento de sustancias radioactivas	8
4.3.6. Capítulo VI: De los registros	8
4.3.7. Capítulo VII: De las medidas preventivas	8
4.3.8. Capítulo VII: De las tasas específicas	8
4.3.9. Capítulos IX - XII: Prohibiciones, sanciones, procedimiento para imponer sanciones y disposiciones finales	8
4.4. Límites de dosis anual para un trabajador ocupacionalmente expuesto	9
5. Alcance	10

6. Protección radiológica	11
6.1. Objetivos y principios	11
6.2. Efectos	12
6.3. Magnitudes radiológicas	13
6.3.1. Magnitudes dosimétricas	13
6.3.2. Magnitudes de radioprotección	14
6.3.3. Magnitudes operacionales	15
6.4. Dosímetro personal	15
7. Especificaciones generales de una clínica de radioterapia	17
7.1. Descripción del acelerador	17
7.2. Medición de radiación con rayos X	18
7.3. Blindajes	20
7.3.1. Descripciones generales	21
7.3.2. Características del cuarto de tratamiento estándar	21
8. Introducción a la estadística circular	25
8.1. Estadística descriptiva circular	25
8.1.1. Medidas de centralización	26
8.1.2. Medidas de dispersión	27
8.2. Otras herramientas estadísticas lineales	28
8.2.1. Series de tiempo	28
8.2.2. Correlación de datos	29
9. Dosímetro personal: análisis de datos	31
9.1. Resultados mensuales	32
9.2. Resultados anuales	35
9.3. Correlación de datos	41
9.4. Comparación de resultados con datos normalizados	44
10. Discusión de resultados	47
11. Conclusiones	49
12. Recomendaciones	50
13. Bibliografía	52
14. Anexos	53
A. Efecto Compton	53
B. Resultados del resto de trabajadores	54
C. Programa creado para el análisis de datos	63
Glosario	74
Lista de símbolos	75

Lista de figuras

4.1. Espectro de la radiación electromagnética [17]	4
4.2. a) Primera radiografía usando rayos X, tomada por Roentgen en 1895. Se muestran los huesos de la mano de su esposa, Bertha. b) Diagrama del montaje experimental de Roentgen, en donde se observa la producción de rayos X y su bombardeo en un objetivo de metal con electrones energéticos de 50 a 100 keV. [27]	5
6.1. Relación de la dosis con los efectos causados por radiación [28]	12
6.2. Ejemplo de un dosímetro de termoluminiscencia (TLD)	16
7.1. Estructura externa e interna de un acelerador lineal (LINAC) para uso clínico [23] .	18
7.2. Modelo de bandas de energía, en la cuál se muestra cómo la termoluminiscencia muestra excitación por la radiación ionizante incidente y se muestran los fenómenos de relajación [5]	19
7.3. Curva de brillo resultante distintos materiales para los TLD [5]	19
7.4. Estructura del cuarto de tratamiento para los laberintos [13]	22
8.1. Representación gráfica de la observación circular en el plano complejo, cuyo vector unitario está representado por \vec{x} . [21]	26
8.2. Ejemplo de una serie de tiempo y su descomposición, usando los datos de la concentración de CO_2 en la atmósfera en el Observatorio de Mauna Loa. [12]	29
8.3. Interpretación del coeficiente de correlación. [29]	30
9.1. Dosis acumulada de cada mes desde el 2010-2019 para a) el médico A y b) el médico B.	32
9.2. Dosis acumulada de cada mes desde el 2010-2019 para el a) físico médico A, b) técnico A y c) ingeniero A.	34
9.3. Serie de tiempo para el médico A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.	36
9.4. Serie de tiempo para el médico B. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.	37
9.5. Serie de tiempo para el físico médico A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.	38
9.6. Serie de tiempo para el técnico A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.	39
9.7. Serie de tiempo para el ingeniero A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.	40
9.8. Gráfico Q-Q para verificar la normalidad de los datos	42
9.9. Correlación de la variable de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo para la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos.	43

9.10. Correlación de las variables normalizadas de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo para la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos.	45
9.11. Componente de estacionalidad para la serie de tiempo de la dosis normalizada para la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos.	46
A.1. Modelo cuántico de la dispersión de los rayos X del efecto Compton 27	53
B.1. Resultados para el trabajador M32MC. Se muestran los resultados a partir del 2013 hasta el 2019.	55
B.2. Resultados para el trabajador M38EP. Se muestran los resultados a partir del 2016 hasta el 2019.	56
B.3. Resultados para el trabajador F10LD. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.	57
B.4. Resultados para el trabajador F27RC. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.	58
B.5. Resultados para el trabajador T19SR. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.	59
B.6. Resultados para el trabajador T26PM. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.	60
B.7. Resultados para el trabajador T35EE. Se muestran los resultados a partir del 2015 hasta el 2019.	61
B.8. Resultados para el trabajador T36ML. Se muestran los resultados a partir del 2015 hasta el 2019.	62

Lista de cuadros

4.1. Categorización de los rayos X según su nivel de energía 11	6
6.1. Valores para el factor de calidad Q para distintas partículas 16	14
7.1. Materiales de construcción para blindajes 13	23
9.1. Explicación de la creación de nomenclatura para la muestra	31
9.2. Resumen de los resultados mensuales de cada trabajador de la muestra	33
9.3. Estadística descriptiva circular para datos mensuales (2010-2019)*	35
9.4. Estadística descriptiva circular para datos anuales (2015-2019) ⁺	41
9.5. Resultados de la prueba de correlación de Kendall	42
9.6. Resultados de la prueba de correlación de Kendall con datos normalizados	44
B.1. Resultados de la prueba de correlación de Kendall con datos normalizados	54

El objetivo general de este trabajo, es realizar un análisis de los datos de dosimetría personal, como método de evaluación de la protección radiológica, de una muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la Clínica de Radioterapia La Asunción. Para analizar los datos, inicialmente se hace un análisis explorativo de la dosis acumulada distribuida en los meses del año, con el fin de determinar si existe alguna tendencia en la distribución de la dosimetría personal. Asimismo, se incluye el análisis de la dosimetría anual con su respectiva desviación estándar circular. Con esto en mente, se incluye una comparación con la dosis permisible de un trabajador expuesto a radiación según el Artículo 70 del Acuerdo Gubernativo Número 55-2001, para verificar que los datos experimentales de la muestra no sobrepasen el límite. Por último, se incluye un análisis de la correlación de los datos de la dosis anual con el número de pacientes anuales, con el fin de determinar si existe una relación lineal entre estas dos variables.

Dentro de los resultados principales, se encontró que cada trabajador presentó un mes diferente con más dosis personal y con distinta magnitud, indicando que la preferencia de la direccionalidad de los datos no era homogénea. Además, se verificó que la muestra de los trabajadores cumple con la dosis permisible, dado que la suma entre los cinco años no sobrepasó de 100 mSv para cada uno. Por último, se encontró que para datos no normalizados del 2015 al 2019, no había correlación de la variable de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo, ya que el valor de p era menor al nivel de significancia del 5%. Sin embargo, al normalizar los datos con respecto a la dosis en el isocentro que el acelerador impartió en ese periodo de tiempo, se encontró que la hipótesis nula se rechazaba, concluyendo que sí existe correlación.

Gran parte de la medicina moderna usada para el tratamiento de cáncer, se debe a la alta tecnología implementada en la radioterapia. La radioterapia es uno de los tres métodos principales para tratar pacientes con cáncer, siendo los otros dos la quimioterapia y la cirugía. Se necesita usar altas dosis de radiación ionizante para destruir las células cancerosas o reducir la velocidad de crecimiento de dichas células al dañar su ADN. [15]

Los descubrimientos acerca de la radiación comenzaron a finales del siglo XIX, con el descubrimiento hecho por el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen acerca de los rayos X, mostrándole al mundo la primera radiografía, en la cual se observó la mano de su esposa. Seguido de él, el físico francés Henri Becquerel hizo el descubrimiento acerca de la fosforescencia natural, o mejor conocida actualmente como la radioactividad. Él descubrió que ciertos elementos fluorescen cuando estos son expuestos a la luz del Sol; uno de los elementos con los que él trabajó fue con el uranio, demostrando que este elemento se caracteriza como una fuente de radiación [25]. Mientras tanto, Marie Curie interesada por el trabajo de Becquerel, descubrió junto con su esposo que, en efecto, existen más elementos radioactivos, siendo estos el radio y el polonio. A lo largo de la vida de Curie, ella promovió el uso del radio para el uso médico durante la Primera Guerra Mundial, así como los primeros estudios de tratamientos médicos usando isótopos radioactivos.

Debido a la aplicación en la medicina que se llevó a cabo después de estos descubrimientos y a ciertos accidentes causados por el uso de la radiación, a mediados del Siglo XX, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) propuso llevar a cabo un conjunto de reglamentos acerca de la protección radiológica que toda práctica profesional debe cumplir. Es por ello que los físicos toman un papel importante dentro de este contexto: ellos se encargan de las técnicas que involucran radiación ionizante para la prevención, tratamiento y diagnóstico de las enfermedades en el ser humano, así como velar de la protección radiológica de los pacientes, personal médico y paramédico dentro del equipo de un hospital. Los especialistas en el área de la física médica suelen ubicarse dentro de los hospitales o clínicas; a través de los años, el físico ha logrado posicionarse como un elemento esencial dentro del equipo profesional en un hospital que haga uso de radiaciones ionizantes en sus procedimientos.

2.1. Objetivo general

Realizar un análisis circular de los datos de dosimetría personal como método de evaluación de la protección radiológica de una muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la Clínica de Radioterapia La Asunción.

2.2. Objetivos específicos

Para los trabajadores ocupacionalmente expuestos en la Clínica de Radioterapia La Asunción:

- Evaluar si hay una tendencia en la distribución de la dosimetría personal mensual y anual.
- Comparar la dosimetría personal de la muestra con la dosis permisible de un trabajador expuesto a radiación.
- Generar un reporte mensual y anual de cada trabajador sobre la dosis reportada desde el inicio de su labor hasta la fecha presente.
- Realizar una correlación lineal para observar la dependencia de la variable de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo.
- Realizar un código accesible a nuevos datos sobre la protección radiológica basada en el dosímetro personal para la Clínica de Radioterapia La Asunción.

Justificación

La importancia de este trabajo, yace en verificar que los parámetros de la protección radiológica se hayan cumplido a lo largo de 10 años por medio del análisis de estos datos, y a su vez, observar el comportamiento que han tenido a lo largo de ese tiempo.

Considerando el hecho que el uso y la aplicación de radiaciones ionizantes conllevan un riesgo potencial para la salud, los bienes y el medio ambiente de los que laboran en un centro de radioterapia, fue necesario regular todas las actividades relacionadas con el uso de radiación ionizante, por medio de disposiciones legales por parte de la Dirección General de Energía.

Como lo requiere la Dirección General de Energía, se deben reportar los datos anualmente de la dosis personal de los trabajadores ocupacionalmente expuestos. De esta manera, se verifica que las clínicas o los centros que cuentan con uso de radiación ionizante, han cumplido con el margen del límite de dosis en sus trabajadores. Este trabajo puede generar una gran utilidad para la protección radiológica en Guatemala; los datos de dosimetría personal se han recolectado y se han tabulado a lo largo de los años, más sin embargo, no se han analizado. Es por eso que es de gran relevancia realizar un análisis de datos, con el fin de corroborar que todos los parámetros de protección radiológica se han cumplido y asimismo, observar el comportamiento en el tiempo de la dosis personal de los trabajadores dentro de la Clínica de Radioterapia La Asunción.

4.1. Radiación

Según la teoría del electromagnetismo, desarrollada por el físico escocés James Clerk Maxwell, predijo que las ondas electromagnéticas se comportan igual que la luz. Estas pueden ser refractadas por espejos de metal, por dieléctricos (como el vidrio) y exhiben polarización e interferencia [27]. Con esto, la radiación se define como la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas en el vacío o en otro medio.

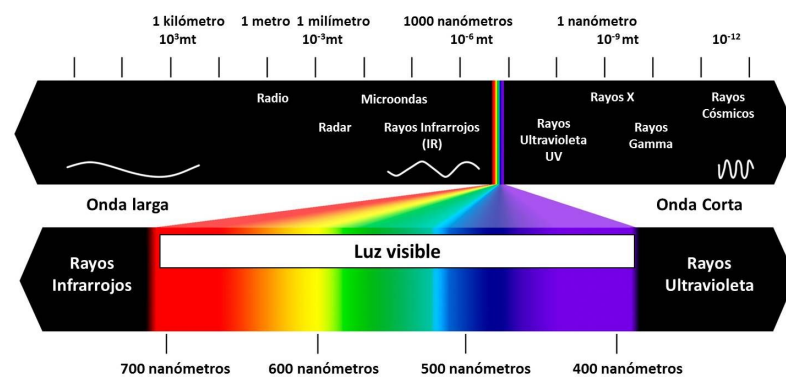


Figura 4.1: Espectro de la radiación electromagnética [17]

Si la radiación transporta energía suficiente como para provocar ionización en el medio, se categoriza como una radiación ionizante; esta ionización puede afectar las células y provocar efectos nocivos para la salud. En caso contrario, se considera como radiación no ionizante.

Existen dos fuentes principales de exposición de la radiación: natural y artificial. Desde siempre, el ser humano ha sido expuesto a radiación por medio de causas naturales. Existen tres fuentes principales para este tipo de radiación:

- **Rayos cósmicos:** Son partículas pesadas y cargadas provenientes del espacio exterior. Estas partículas tienden a ser deflectadas en la región ecuatorial del planeta debido al campo

magnético de la Tierra y por ello, se encuentran más en las regiones polares.

- **Rayos gamma externos:** Estos rayos nacen de la radioactividad propia generada por la corteza de la Tierra. Esta actividad tiende a ser más alta en regiones con rocas graníticas.
- **Radiación interna:** Este tipo de radiación se debe puramente a los materiales radioactivos del cuerpo humano. Por ejemplo, el aire contiene radón, por lo que continuamente este elemento se encuentra entrando y saliendo de los pulmones.

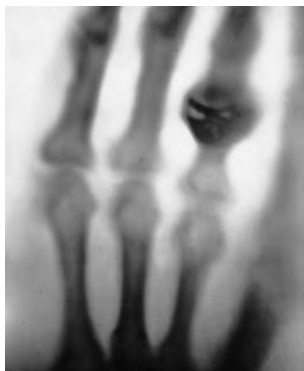
A estas fuentes, en conjunto, se le conoce como radiación de fondo. Es evidente que la cantidad que recibe cada persona de este tipo radiación depende del lugar en donde vive, la composición del suelo y la latitud.

Por otro lado, la radiación artificial hace referencia a la radiación producida por el hombre, por medio de máquinas creadas para para uso médico, de minería, de industria, etc.

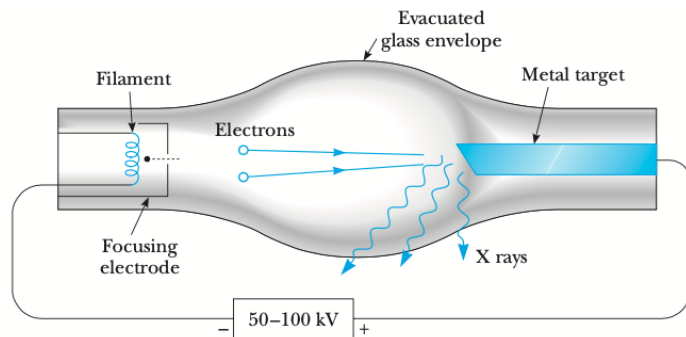
4.2. Rayos X

Los rayos X fueron descubiertos por el físico alemán Wilhelm Roentgen en 1895, siendo estos el primer tipo de radiación artificial que ha sido utilizado por el ser humano. Mientras trabajaba con un tubo de rayos catódicos en su laboratorio, descubrió que un haz de electrones de alta velocidad, el cual golpeaba un objetivo metálico, producía un tipo de radiación extremadamente penetrante. El tubo parecía fluorecer con luz verde cuando se le aplicaba un voltaje alto, a pesar de cubrirlo con un papel negro pesado [25]. Debido a esto, Roentgen pensó que este nuevo rayo era emitido desde el tubo, siendo capaz de atravesar el papel negro pesado y de esta manera, el rayo lograba excitar los materiales fosforescentes en el laboratorio. Se descubrió que este rayo podía atravesar la mayoría de objetos sólidos, sin incluir el metal y el hueso [27].

En diciembre de 1895, su primer experimento introdujo la primera radiografía de la historia, mostrando de esta manera la mano de su esposa, tal como se muestra en la Figura 4.2a.



(a) Primera fotografía con rayos X



(b) Montaje del experimento de Roentgen

Figura 4.2: a) Primera radiografía usando rayos X, tomada por Roentgen en 1895. Se muestran los huesos de la mano de su esposa, Bertha. b) Diagrama del montaje experimental de Roentgen, en donde se observa la producción de rayos X y su bombardeo en un objetivo de metal con electrones energéticos de 50 a 100 keV. [27]

Meses después, las primeras radiografías fueron tomadas para uso médico y años después, se hizo evidente que los rayos X son parte de la radiación electromagnética. Cuentan con una frecuencia demasiado pequeña y una gran habilidad de penetrar superficies, con una longitud de onda en el orden de $\lambda \sim 10^{-10}$ m. El espectro de estos rayos se compone de la superposición de los picos discretos de los rayos individuales (estos picos reciben el nombre de radiación característica), formando un espectro continuo llamado *bremstrahlung* o radiación blanca [16]. Se le da el nombre de radiación blanca por la similitud que tiene con el espectro continuo de la luz blanca emitida por un filamento caliente de una bombilla de luz.

Los rayos X son emitidos por partículas cargadas al cambiar su nivel energético en el átomo; este proceso se le conoce popularmente como la radiación característica o fluorescencia de rayos X.

4.2.1. Uso en la medicina

En la medicina, los rayos X son usados para diagnóstico y radioterapia. Cabe mencionar que los tubos de rayos X usados para estos casos varían dependiendo del propósito para el cuál estén diseñados.

Para el caso de diagnósticos, los tubos de rayos X están diseñados para producir una imagen de sombra de la parte del cuerpo del paciente; sin embargo, aunque el paciente esté completamente inmobilizado, el movimiento que se realiza debido a la respiración y a los bombeos del corazón son difíciles de controlar. Es por ello que, en orden para que la imagen salga nítida (sin los errores causados por el movimiento respiratorio y circulatorio), se distribuye una gran cantidad de electrones hacia un objetivo, para parecer que los rayos X son emitidos desde un punto fuente con una exposición suficientemente corta, logrando así congelar el movimiento mencionado. [16]

Con respecto a los tubos de rayos X usados en la terapia, la energía de entrada es pequeña en comparación con los tubos empleados en los diagnósticos. En el uso de terapia, el punto focal debe ser grande para que no haya dificultad en diseñar el ánodo para poder manipular la entrada de energía, sin usar el ánodo de rotación. Tubos especiales se han diseñado para tratamientos en específico [16]. En el caso de dermatología, se usan rayos X de baja energía a una distancia corta de la piel del paciente; estos rayos de baja intensidad se les conoce como rayos Grenz (ver Tabla 4.1).

A continuación se detallan los tipos de rayos X que se usan en distintos ámbitos, dependiendo de la energía en la que se emitan.

Tabla 4.1: Categorización de los rayos X según su nivel de energía [11]

<i>Nombre que reciben</i>	<i>Energía</i>
Rayos Grenz o <i>soft rays</i>	0.1 kV – 20 kV
Diagnóstico	20 kV – 120 kV
Ortovoltaje	120 kV – 300 kV
Energía intermedia	300 kV – 1 MV
Megavoltaje	> 1 MV

4.2.2. Beneficios al paciente

Dado que los rayos X son una herramienta esencial para el diagnóstico y tratamiento del paciente, se deben reconocer los beneficios que brindan:

- Sirven de guía para el personal médico a medida que insertan catéteres u otros dispositivos dentro del paciente. [19]
- Ayudan al tratamiento de tumores y eliminan coágulos de sangre y otros bloqueos similares.
- Una radiografía puede mostrar una característica o patología que es diferente del motivo inicial de la realización de la imagen (e.g., infecciones en los huesos, gases o líquidos en áreas donde no debería haber ninguno).

4.2.3. Daños y riesgos para el trabajador

Dado que los trabajadores se exponen a pacientes, quienes se someten a diagnósticos y tratamiento de radioterapia, siempre existe la probabilidad que los rayos X puedan causar mutaciones en el ADN, por lo que puede liderar a un posible desarrollo de cáncer. Por esta misma razón, la Organización Mundial de Salud los ha clasificado como cancerígenos [19].

4.3. Ley de protección radiológica en Guatemala

Las exposiciones médicas a la radiación se han convertido en un tema de mucho cuidado para todos los trabajadores que laboran dentro del área, así como para las personas que reciben el tratamiento médico. Es por ello que el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) propuso una colección de normas de seguridad para la regularización de la protección radiológica, dirigida a todos los centros que emplean la radiación ionizante para sus tratamientos y diagnósticos. Una técnica recurrente para medir las radiaciones absorbidas por una persona expuesta a las radiaciones ionizantes recibe el nombre de dosimetría personal.

En Guatemala, la legislación correspondiente sobre la protección radiológica y nuclear toma acción con el Decreto Ley 11-86 [10], en el cual se incluyen los artículos para el control, uso y aplicación de radioisótopos y radiaciones ionizantes. A continuación, se presenta una breve descripción del contenido de dicha Ley, mencionando los aspectos destacados del contenido de cada capítulo.

4.3.1. Capítulo I: Disposiciones generales

Se narra una serie de abreviaciones y definiciones de términos clave, tales como la dosimetría, dosis absorbida, energía atómica, exposición, radioisótopos, etc. Asimismo, se hace mención que «el objetivo de esta ley es el poder controlar, supervisar y fiscalizar todas las actividades relacionadas con el uso de radioisótopos y las radiaciones ionizantes en sus diversos campos de aplicación, a fin de proteger la salud, los bienes y el medio ambiente de los habitantes de la República, así como los bienes del Estado». [8]

4.3.2. Capítulo II: Competencia

Se establecen las funciones y atribuciones que debe realizar la Dirección, la cual es la dependencia del Ministerio calificada para cumplir con el objetivo mencionado en el Capítulo I.

4.3.3. Capítulo III: De las inspecciones

Se hace mención de las inspecciones que se deben realizar para comprobar el cumplimiento de la ley, de los requisitos y condiciones fijadas en las licencias, de las condiciones de seguridad para el personal y el público en general, de los daños a instalaciones radioactivas y equipos generadores de radiación, de las noticias o denuncias de abandono, etc.

4.3.4. Capítulo IV: De las licencias

Se mencionan las personas, instituciones y entidades que pueden obtener la licencia para la práctica médica sobre la radiación, incluyendo la licencia de construcción y/o instalación de equipos radioactivos. Por último, menciona que al momento que ocurra una violación a la Ley, La Dirección tiene la autoridad de suspender o cancelar la licencia otorgada.

4.3.5. Capítulo V: Del desplazamiento de sustancias radioactivas

Se establecen las normas y procedimientos a seguir para la debida importación y/o exportación de sustancias radioactivas, así como para los equipos que contengan dichas sustancias.

4.3.6. Capítulo VI: De los registros

Según el Artículo 24, menciona que «quien posee sustancias radiactivas de conformidad de la licencia obtenida, debe llevar un registro escrito de la recepción, tenencia y transferencia de dichas sustancias, el que deberá exhibir cada vez que le sea requerido por la Dirección o inspectores.» [8](#)

4.3.7. Capítulo VII: De las medidas preventivas

Se menciona que todo personal que desempeñe actividades en instalaciones radioactivas, debe llevar su debida capacitación, así como su dosímetro personal aprobado por La Dirección. Se menciona que todos los equipos de generadores de radiaciones ionizantes deben ser calibrados periódicamente.

4.3.8. Capítulo VII: De las tasas específicas

Hace mención que los servicios que presta La Dirección a personas individuales o jurídicas, nacionales o extranjeras, deberán pagar la tasa específica. Establece que estos fondos son dirigidos para capacitaciones y otorgamiento de becas para la preparación de personal de La Dirección, así como la adquisición de equipo y materiales nuevos para los servicios indicados.

4.3.9. Capítulos IX - XII: Prohibiciones, sanciones, procedimiento para imponer sanciones y disposiciones finales

Se establecen las prohibiciones, así como las sanciones como la violación a la ley o como las irresponsabilidades civiles. Se menciona el debido procedimiento que se debe imponer al momento que suceden dichas sanciones. Por último, se hace mención a las disposiciones finales, mostrando que La Dirección mantendrá la confidencialidad de la información de datos, compilaciones e interpretaciones. Esta Ley entró en vigencia el 10 de enero de 1986.

4.4. Límites de dosis anual para un trabajador ocupacionalmente expuesto

Según el Artículo 70 del Acuerdo Gubernativo Número 55-2001 [9](#), la exposición de un trabajador ocupacionalmente expuesto a radiación ionizante requiere que no sobrepase ninguno de los siguientes límites:

- a) Una dosis efectiva promedio de 20 mSv por año, en un período de cinco años consecutivos
- b) Una dosis efectiva de 50 mSv en un solo año
- c) Una dosis equivalente de 150 mSv en un año para el cristalino del ojo
- d) Una dosis equivalente de 500 mSv en un año para las extremidades del cuerpo

El alcance que tiene este trabajo a mediano plazo es que puede utilizarse para los futuros reportes de dosimetría personal elaborados en la Clínica de Radioterapia La Asunción, en los cuales se evidencia que no se supera la dosis permisible, tal como lo requiere la Dirección General de Energía. Aparte de incluir el análisis temporal y circular para verificar que no se supera el límite de dosis, se puede implementar el análisis de la correlación de datos usado, con el fin de observar si el coeficiente de correlación se fortalece o se debilita conforme avance el tiempo.

A largo plazo, puede implementarse en todos los centros de radioterapia a nivel nacional, con el fin de estructurar el manejo de información de manera homogénea. Esto brindará una mejor presentación de los datos, y a su vez, otorgará un análisis más detallado sobre la protección radiológica de los trabajadores ocupacionalmente expuestos del país.

Cabe mencionar que, dentro del desarrollo del análisis de la correlación de datos, se presentó la limitante de que no se contaba con los datos del número de tratamientos administrados en cada mes antes del 2010. En caso contrario, esto hubiese sido significativo para el coeficiente de correlación.

Protección radiológica

El uso de radiaciones ionizantes en centros con fines diagnósticos y terapéuticos, conllevan a la exposición del personal que labora en dichas instalaciones. Es por eso que, la protección radiológica cuantifica la exposición del cuerpo humano a la radiación, clasificando los tipos de exposiciones ante radiaciones ionizantes como se menciona a continuación:

- **Exposición ocupacional:** Radiación recibida por profesionales expuestos por consecuencia de su trabajo.
- **Exposición médica:** Radiación recibida por personas en un tratamiento médico o en su propio diagnóstico.
- **Exposición al público:** Radiación recibida por cualquier otro medio que no sea ocupacional o médica, con origen natural o artificial.

Las actividades que están relacionadas con el personal ocupacionalmente expuesto (**POE**), tiene como consecuencia la exposición a radiación ionizante, ya sea por medio de las aplicaciones médicas como: fuentes de rayos x, producción de energía nuclear, etc. Las prácticas médicas conllevan varios procedimientos que diariamente genera exposición a la radiación ionizante. Dado eso, se ha visto en necesidad hacer un programa de protección radiológica aplicado a los trabajadores involucrados en esta área, para que de esta manera, se garantice el uso seguro de las radiaciones ionizantes.

6.1. Objetivos y principios

El objetivo principal de la protección radiológica es asegurar la protección del trabajador y paciente, optimizando y sin limitar de forma completa, las prácticas del uso de radiaciones. Con esto, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (**ICRP**), propuso que para cumplir con el objetivo mencionado anteriormente, se deben aplicar los principios fundamentales de la dosis radiológica [14]:

1. *Justificación*: Se deben justificar todas las exposiciones médicas, indicando los niveles de responsabilidad. La práctica que involucre la exposición a radiación debe ser únicamente para el beneficio de los individuos expuestos o para la sociedad, que sea suficiente como para compensar el detrimento que se causa.
2. *Optimización*: Se debe reducir el número de personas expuestas a radiación, así como la probabilidad de exposición y la magnitud de dosis individual, manteniéndose lo más bajo que sea razonablemente posible, teniendo en cuenta el factor económico y social.
3. *Límite de dosis*: La dosis recibida por cualquier individuo debe ser lo más baja posible, manteniendo las medidas de protección. Esto se le conoce como el principio **ALARA** (tan bajo como sea razonablemente posible, o por sus siglas en inglés, «As Low As Reasonably Achievable»).

6.2. Efectos

Los efectos biológicos de la radiación se categorizan en dos grupos principales:

Los *efectos deterministas*, también llamados reacciones tisulares, son efectos que surgen si se ha depositado una dosis equivalente suficientemente alta. Este efecto es observable clínicamente si la dosis de radiación está por encima de un umbral. El valor de este umbral depende de la tasa de dosis, el tipo y volumen del órgano o tejido irradiado y la transferencia lineal de energía [14]. Cada persona expuesta a una cantidad que sobrepase el umbral, mostrará este tipo de efecto con una probabilidad de ocurrencia del 100%. Algunos ejemplos de efectos deterministas son: la pérdida de cabello, lesión en la piel, vómitos, etc.

Los *efectos estocásticos* son efectos de tipo probabilísticos, los cuales pueden aparecer por alguna mutación en el ADN, conllevando a una condición maligna (efecto somático). Este tipo tiene una probabilidad de ocurrencia muy baja, y solo sucede en aquellas células que son expuestas [26]. También cabe mencionar que pueden ocurrir efectos hereditarios; estos solamente suceden si el daño es inicialmente provocado en células germinales. Algunos ejemplos de los efectos estocásticos son: cáncer y leucemia.

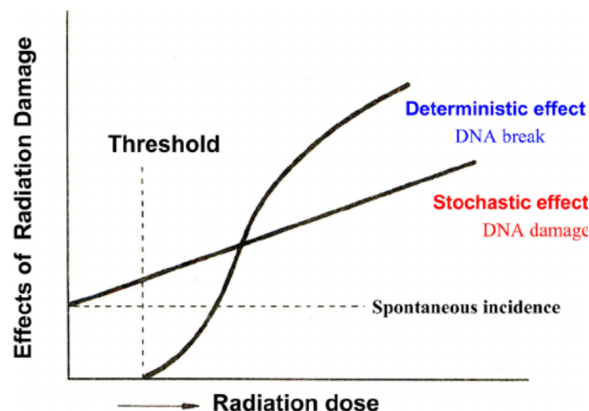


Figura 6.1: Relación de la dosis con los efectos causados por radiación [28]

Como se muestra en la Figura 6.1 asumiendo que el efecto estocástico depende de los niveles de dosis, se observa que su comportamiento es lineal y creciente. Para el efecto determinístico, después de pasar el umbral, se observa un crecimiento logístico.

6.3. Magnitudes radiológicas

Ya que se introdujeron los efectos y los posibles daños de la radiación ionizante, es indispensable caracterizar de forma cuantitativa la cantidad de este tipo de radiación para disponer un conjunto de magnitudes que ayuden a la protección radiológica. Es por ello que, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU) se encarga de la definición formal de las magnitudes y unidades radiológicas, así como desarrollar métodos adecuados de medida [26].

6.3.1. Magnitudes dosimétricas

Dado que anteriormente se habló acerca de la *exposición*, entonces ahora se define matemáticamente como:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (6.1)$$

en donde dQ es el valor absoluto de la carga total de todos los iones producidos en el aire, y dm es la masa que absorbe todos los electrones liberados por fotones. La unidad en el SI es el coulomb por kilogramo (C/kg). Esta magnitud está definida exclusivamente para un haz o campo de fotones (rayos x o gamma) en el aire.

El **KERMA** (por sus siglas en inglés, Kinetic Energy Released per unit Mass) se define como

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (6.2)$$

en donde dE_{tr} es la suma de todas las energías cinéticas iniciales de las partículas ionizantes cargadas, liberadas por partículas ionizantes no cargadas en un material de masa dm . La unidad en el SI es el joule por kilogramo (J/kg) pero que también recibe su nombre especial como el gray (Gy).

La *dosis absorbida* por un material se define como

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (6.3)$$

en donde $d\bar{\epsilon}$ es la energía promedio impartida por la radiación en un material con masa dm . Con esto, $\bar{\epsilon}$ representa entonces la energía neta que se almacena en el volumen del material. La unidad en el SI corresponde al gray, siendo la misma dimensional que se usa para el kerma. La dosis absorbida es válida para cualquier tipo de radiación, por lo cuál solo se necesita especificar el material en el que se cede la energía [4].

La *transferencia lineal de energía* (LET lineal energy transfer en inglés) se define matemáticamente como

$$L = \frac{dE}{dl} \quad (6.4)$$

donde dE es la energía disipada por partículas cargadas al recorrer una trayectoria dl . Este parámetro da la tasa en la cuál una partícula ionizante deposita su energía en su trayectoria; esta cantidad se puede expresar en eV/m, según la unidad establecida por el SI.

6.3.2. Magnitudes de radioprotección

Para obtener una cantidad física que cuantifique el daño sufrido por una persona expuesta a radiación ionizante, se define el término de *dosis equivalente*:

$$H = D \cdot Q \quad (6.5)$$

en donde D es la dosis absorbida y Q es el factor de calidad determinado por el tipo de radiación en la exposición. La dimensional correspondiente a la dosis equivalente es el sievert ($1 \text{ Sv} \equiv 1 \text{ J/kg}$).

Dado que la dosis absorbida es el único término que cuenta con dimensional dentro de la Ecuación (6.5), la dosis equivalente descrita en sieverts tiene la misma dimensional que el gray. La relación entre estas unidades está descrita por

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}, \quad 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg} \quad (6.6)$$

El factor de calidad Q puede ser descrito por el parámetro físico de la transferencia lineal de energía (LET). Varios experimentos radiológicos han demostrado que, en general, las trayectorias densas producidas por partículas pesadas, tienden a generar un mayor efecto biológico. A comparación del electrón, la trayectoria de transferencia lineal de energía es baja [16]. En conclusión, se puede decir que Q es una función que depende de LET

Para establecer los límites para proteger a los trabajadores y pacientes de los efectos de la radiación ionizante, se introducen las magnitudes de valor promedio. La probabilidad de efectos estocásticos depende no solo de la dosis absorbida, sino que del tipo y energía de la radiación usada. La ICRP introdujo entonces los «factores ponderales de radiación» para definir nuevas magnitudes. La *dosis equivalente en un órgano o tejido T* debida a la radiación R se define como

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad (6.7)$$

en donde w_R es el factor de ponderación para la radiación R , y $D_{T,R}$ es la dosis absorbida promedio para la radiación R en el órgano o tejido T . Si una persona está expuesta a varios tipos de radiación al mismo tiempo, entonces la Ecuación (6.7) se convierte en la suma de las dosis equivalentes individuales:

$$H = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (6.8)$$

A continuación se presenta una tabla que resume los valores de w_R para partículas dadas:

Tabla 6.1: Valores para el factor de calidad Q para distintas partículas [16]

Tipo de radiación	LET [keV/μm]	w_R
Rayos x, rayos gamma y electrones	≤ 3.5	1
Neutrones, protones	7	2
Partículas α (alfa), núcleos pesados	53	20

Los efectos estocásticos también dependen del órgano en el que se esté irradiando, es por ello que se consideró definir otra magnitud que tomase en cuenta la combinación de diferentes dosis en distintos órganos, a partir de la dosis equivalente. Entonces, se define la *dosis efectiva* como

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_{T,R} w_T w_R D_{T,R} \quad (6.9)$$

en donde w_T es el factor de ponderación para dicho órgano. Los efectos biológicos dependen de otros factores que no sea solamente la dosis, tal como la tasa de dosis, los factores ambientales del tejido (como el oxígeno) y la distribución espacial del patrón de dosis [16]. Por ejemplo, si un isótopo es inyectado y depositado en un hueso, entonces habrán regiones con más concentración local.

6.3.3. Magnitudes operacionales

Para la vigilancia individual, se recomienda el uso del *equivalente de dosis personal*. Esta magnitud, denotada por $H_p(d)$, es el equivalente de dosis en tejido blando, por debajo de un punto específico del cuerpo a una profundidad d [20]. Esta cantidad física tiene las mismas dimensionales que la dosis equivalente, siendo esta el sievert (Sv). Para radiaciones débilmente y fuertemente penetrantes, se recomienda usar profundidades de $d = 0.07$ mm y $d = 10$ mm. El $H_p(10)$ se usa para proporcionar una estimación de la dosis efectiva. Para calcular la dosis equivalente en la piel, se usa $H_p(0.07)$ porque las células sensibles en la piel están entre 0.05-0.10 mm debajo de la superficie de la piel [20].

6.4. Dosímetro personal

Ahora que ya se introdujeron las cantidades físicas que miden el daño ocasionado a una persona expuesta a radiación ionizante, es importante mencionar la evaluación de la dosis individual. Una de las técnicas para medir cuánta radiación fue absorbida por una persona u objeto expuesto a radiaciones ionizantes, recibe el nombre de dosimetría [7].

Cuando las personas laboran en zonas donde se exponen a radiación ionizante, es necesario determinar la dosis individual de cada persona. Se necesita contar con un programa de vigilancia radiológica individual para poder optimizar la protección del POE. Este programa retorna información sobre la dosis de cada trabajador, con el único fin de verificar que no sobrepase el límite de dosis establecido. Debido a esto, es obligatorio que cada trabajador cuente con un dosímetro integrador.

En la Clínica de Radioterapia La Asunción, el servicio prestado para medir la dosimetría personal es a través de un dosímetro de termoluminiscencia (TLD). Un TLD es un dosímetro de radiación pasiva (un dosímetro pasivo produce una señal inducida por radiación, la cuál se almacena en el dispositivo. Luego, se procesa el dosímetro y se analiza la salida), el cuál mide la exposición a radiación ionizante por medio de la medición de la intensidad de luz visible emitida por un cristal sensible en el detector, cuando este se calienta [3].

El proceso de funcionamiento de un TLD se detalla a continuación:

1. El chip (detector del TLD) absorbe la radiación y cambia su estructura ligeramente cuando la radiación ionizante pasa a través del chip.
2. En los materiales termoluminiscentes, debido a la radiación ionizante, los electrones alcanzan el intervalo de energía que les permite sufrir aceleraciones por la presencia de un campo eléctrico externo, permitiendo a su vez las corrientes eléctricas. Sin embargo, se añaden impurezas en el material para atrapar a los electrones en ese intervalo y mantenerlos allí.
3. Los electrones que quedan atrapados, representan la energía almacenada durante el tiempo que estos están retenidos.



Figura 6.2: Ejemplo de un dosímetro de termoluminiscencia (TLD)

4. El chip del TLD se calienta para obtener la dosis recibida. Los electrones que quedaron atrapados regresan a su estado base, emitiendo fotones. La cantidad de luz emitida en relación con la temperatura recibe el nombre de *curva de brillo* (esta curva es analizada para determinar la dosis).
5. Cuando se realiza la lectura de la dosis recibida, el TLD se vuelve a calentar a una temperatura alta. Esto provoca que el material termoluminiscentes regrese a su estado inicial, debido a la liberación de los electrones atrapados.
6. Una vez los electrones son liberados, el TLD está listo para su reutilización.

El lector del TLD básico contiene los siguientes componentes:

- *Calentador*: Se encarga de elevar la temperatura del material termoluminiscentes.
- *Tubo fotomultiplicador*: Se encarga de amplificar y medir la salida de la luz.
- *Medidor*: Se encarga de mostrar y grabar datos.

Existen varias ventajas y desventajas al momento de usar los TLD. Como ventajas, se tiene que las dosis de los TLD se puede obtener fácilmente y son fácil de reusar. Dentro de las desventajas, se encuentra que, cada dosis no se puede leer más de una vez.

Los dosímetros de TLD son usados cuando no se requiere información en el tiempo real, sino que se desea más que todo para un registro preciso del monitoreo de la dosis acumulada del **POE**. Una vez se complete el registro anual de los trabajadores ocupacionalmente expuestos, se genera un informe, el cual es entregado al Ministerio de Energía y Minas para evidenciar que se cumpla con las regulaciones de la protección radiológica.

Especificaciones generales de una clínica de radioterapia

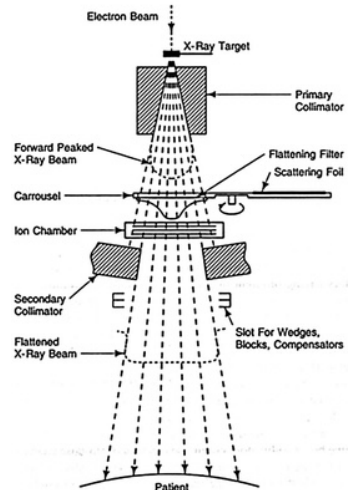
7.1. Descripción del acelerador

Nuevos cambios y técnicas han surgido en el tipo de máquinas que usan altas energías, especialmente las que son empleadas para tratamientos de radioterapia, ya que constantemente se encuentran en un proceso de mejoramiento para su mayor precisión de uso. Estos son llamados aceleradores lineales, también conocidos como **LINAC**.

El **LINAC** es usado para tratamientos de radioterapia usando un haz externo, administrando partículas de altas energías, esencialmente rayos X o electrones, hacia la región donde se encuentra el tumor del paciente [6]. Estos aceleradores están construidos en montaje isocéntrico, cuyo sistema de operación está conformado por: gantry (brazo rotante), soporte, gabinete modulador, camilla para tratamiento y consola de control (ver Figura 7.1b).

El **LINAC** realiza una serie de pasos para poder llevar el haz hacia el paciente:

1. Acelera los electrones por medio de una guía de ondas, en donde los electrones recorren, hacia adelante y hacia atrás, una trayectoria recta sometidos a una diferencia de potencial relativamente baja.
2. Estos electrones chocan contra un blanco para producir rayos X de alta energía, aproximadamente de 4 a 35 MeV [16].
3. Estos rayos X son moldeados por un colimador que está incorporado en el cabezal del acelerador, con el fin de formar un haz que asemeja la forma del tumor del paciente.
4. Luego, pasan por un filtro aplanador para que estos obtengan una distribución uniforme.
5. A continuación, estos pasan por una cámara de ionización fija para monitorear la dosis, la simetría del campo y controlar la óptica del haz [24].
6. El haz pasa por los colimadores secundarios móviles, los cuales se pueden girar alrededor del eje y están diseñados para proporcionar cualquier tamaño de campo rectangular en el isocentro.



(a) Diagrama esquemático



(b) Partes externas del acelerador

Figura 7.1: Estructura externa e interna de un acelerador lineal (LINAC) para uso clínico [23]

Un ejemplo ilustrativo se muestra en la Figura 7.1a, en el cual se diagrama esquemáticamente todo este proceso.

La mayoría de LINACs para uso clínico usan un montaje isocéntrico, donde la fuente está en el gantry y en todo momento está a una distancia constante del eje de rotación. Para el tratamiento, primero se coloca al paciente con el centro del tumor en el eje de rotación (isocentro). Después de ello, el acelerador se programa para que el haz salga del gantry, y de esta manera, entregar la dosis prescrita al tumor. Esta dosis se puede administrar modificando el ángulo del gantry o de la camilla, según sea requerido por cada caso.

7.2. Medición de radiación con rayos X

Existen varios métodos de medición de radiación ionizante, tales como el método ionométrico, químico, de estado sólido, etc. Debido a que en el presente estudio se acota al método de termoluminiscencia (TLD), este es el único método que se expondrá.

La termoluminiscencia es la emisión de luz, que presentan los sólidos cristalinos al ser calentados después de ser expuestos a radiación ionizante. Este proceso se divide en dos fases principales: excitación y relajación. Estas fases pueden ser explicadas por medio de un modelo de bandas de energía.

En la Figura 7.2 se denomina BC a la *banda de conducción*, la cuál está separada de la banda de valencia, denotada por BV. Esta banda está separada por un rango de energías no permitidas, las cuales reciben el nombre de *banda prohibida*. Como consecuencia de las impurezas (o la agregación de estas) del sólido cristalino, aparecen niveles discretos de la banda prohibida, las cuales reciben el nombre de *trampas T* y *centros de recombinación R*. En las temperaturas de $[-10^{\circ}, 60^{\circ}]$, los materiales termoluminiscentes son aislantes eléctricos, y como consecuencia de esto, no son portadores de cargas libres en la banda de conducción.

Durante la excitación, la radiación ionizante incidente transfiere energía suficiente a los electrones ligados a la banda de valencia. A partir de este momento, estos actúan como electrones libres en la banda de conducción. Una gran cantidad de los electrones libres, recién creados, regresan inmediatamente a la banda de valencia; este proceso se le conoce como *recombinación directa*. Sin

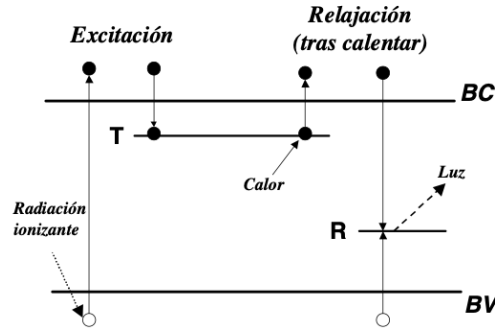


Figura 7.2: Modelo de bandas de energía, en la cuál se muestra cómo la termoluminiscencia muestra excitación por la radiación ionizante incidente y se muestran los fenómenos de relajación [5]

embargo, algunos quedan atrapados en las trampas T , los cuales están situados en la banda prohibida. El detector queda en un estado de equilibrio débilmente estable, en donde los electrones atrapados son proporcional a la dosis absorbida.

En la banda de valencia se produce algo similar, creando una especie de «huecos», provocando que la movilidad sea mucho más reducida que la de los electrones en la banda de valencia. El detector puede estar en este estado por un tiempo indefinido si es que se producen recombinaciones espontáneas, las cuales dependen de la temperatura ambiente. Este efecto sucede en todos los procesos activados térmicamente, conociéndose como *desvanecimiento*. Los efectos que conllevan este fenómeno, deben ser considerados para las evaluaciones dosimétricas.

Para los materiales termoluminiscentes, la relajación se alcanza mediante la aplicación de calor. Los electrones atrapados anteriormente regresan a la banda de conducción, debido a la energía térmica recibida. Nuevamente, los electrones se relajan por medio de una recombinación directa, aunque una fracción de ellos se recombina en los niveles discretos (centros de recombinación R), los cuales están situados en la banda prohibida. En este punto, se produce una emisión de luz, cuya intensidad es proporcional a la dosis absorbida por el detector [22]. Cuando se grafica la intensidad de la luz como función de la temperatura durante la estimulación térmica, se obtiene una curva como se muestra en la Figura [7.3]. Esta curva recibe el nombre de *curva brillante*, cuya forma y características son específicas del material termoluminiscente. El pico correspondiente también se observa en la temperatura específica; a esto se le llama *pico brillante* [2].

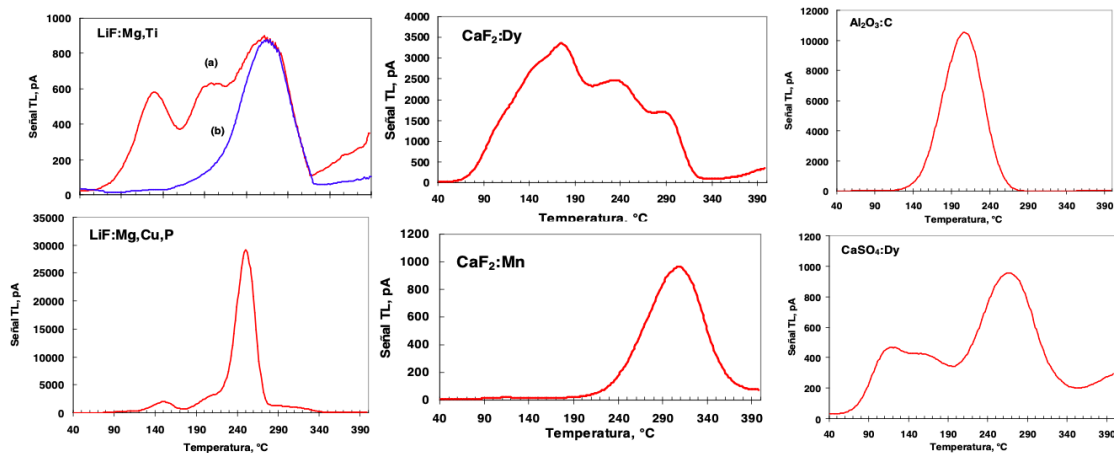


Figura 7.3: Curva de brillo resultante distintos materiales para los TLD [5]

La expresión simple de la cinética de los electrones atrapados fue descrita por Randall y Wilkins [2], usando la siguiente ecuación:

$$p = \frac{1}{\tau} = \alpha e^{-E/kT} \quad (7.1)$$

en donde p es la probabilidad de escape por unidad de tiempo, τ es la vida media que tienen dentro de la trampa, α es el factor de frecuencia, E es la energía de profundidad de la trampa, y k es la constante de Boltzman. Si se asume que E, k, α son constantes, entonces si la temperatura T aumenta, p también aumenta y τ decrece. Estos alcanzan un máximo en alguna temperatura T_m , seguidos de un decrecimiento. Al tener la presencia de dos o más energías de profundidad de la trampa, ocurren varios picos brillantes, tal como se observa en la Figura 7.3

El valor de T_m está relacionado con la tasa de calentamiento lineal q , descrita por la siguiente ecuación:

$$\frac{E}{kT_m^2} = \frac{\alpha}{q} e^{-E/kT_m} \quad (7.2)$$

cuyas dimensionales están en K/s . Los picos brillantes se pueden usar si la tasa es estable. De esta manera, se obtiene la cantidad de radiación absorbida de rayos X por un dosímetro de termoluminiscencia.

Los materiales más usados para los TLD son más que todos materiales sintéticos, con pequeñas cantidades de impurezas. Algunos ejemplos son:

- Fluoruro de litio (LiF:Ti,Mg | LiF:Mg,Cu,P)
- Fluoruro de calcio manganeso (CaF₂:Mn)
- Oxido de aluminio de carbono (Al₂O₃:C)
- Sulfato de calcio dopado con disprosio (CaSO₄:Dy)
- Borato de litio activado por cobre, plata y fósforo (Li₂B₄O₇:Cu,Ag,P)

La sensibilidad que cuentan estos materiales es proporcional a su número atómico efectivo, el cual depende a su vez del coeficiente másico de absorción de energía $(\mu_{en}/\rho)_{TL}$. La respuesta del material con la energía de fotones $S(E)_{ref}$ puede aproximarse como:

$$S(E)_{ref} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_{TL}}{(\mu_{en}/\rho)_{ref}} \quad (7.3)$$

en donde $(\mu_{en}/\rho)_{ref}$ es el coeficiente de un material de referencia (generalmente aire o tejido).

El límite de detección de los TLD es de 0.05 μ Sv, con una incertidumbre estimada de 10%. Debido a esto, estos dosímetros se han categorizado como los detectores más adecuados para la dosimetría.

7.3. Blindajes

Casi la mitad de los pacientes de cáncer reciben tratamiento por medio de radioterapia, por lo que la OIEA se vio en la necesidad de crear un reporte de seguridad para la construcción de

instalaciones de radioterapia, con el fin de desarrollar los requisitos para el diseño y el blindaje de dichas instalaciones.

7.3.1. Descripciones generales

Las instalaciones que brindan tratamiento por radiación, cuentan con barreras primarias y secundarias. Las barreras primarias se encuentran en el techo y en el suelo, ya que en estas áreas es donde el haz principal de radiación puede irradiar. Las segundas barreras se encuentran en las paredes restantes, las cuales se encargan de proteger las fugas de radiación [13].

Cada instalación cuenta con un área controlada y una área supervisada. El área controlada es un espacio en el cuál se establecen medidas de protección y disposiciones de seguridad específicas, contando con acceso restringido. Un área supervisada es aquella área en la cuál las condiciones de exposición ocupacional se mantienen bajo revisión, aunque normalmente, no se necesitan medidas de protección específicas y disposiciones de seguridad. La sala de tratamiento se categoriza como un área controlada, así como otras áreas cercanas a la sala de tratamiento, siempre y cuando, la instalación no puede diseñarse de manera que los niveles de dosis en estas áreas sean lo suficientemente bajos como para que puedan considerarse áreas supervisadas.

El término de *carga de trabajo*, denotado por W , se usa para indicar la radiación de salida por semana de las fuentes externas de rayos X y rayos gamma. Para un LINAC el número de pacientes tratados al día es de 50 (en un intervalo de 8 horas). Para pacientes que reciben una dosis de 4 Gy a 1 m por paciente, se estima una cifra de carga de trabajo de 1000 Gy/semana (considerando que se trabajó cinco días de la semana) [13].

Al calcular el espesor de barrera requerido para cada haz, se emplea el *factor de uso*, denotado por U , el cual describe las diferentes orientaciones de la fuente usada para el tratamiento. Se sugiere un factor de 1 para el suelo con el haz apuntando verticalmente hacia abajo, y 0.25 para cada pared y techo.

El *factor de ocupancia*, denotado por T , se refiere a la cantidad de tiempo que están ocupadas las salas vecinas a la sala de tratamiento. El factor de ocupación de un área debe considerarse como la fracción de tiempo que pasa una sola persona que permanece allí más tiempo.

7.3.2. Características del cuarto de tratamiento estándar

Para evitar problemas sobre la protección radiológica derivados de las salas de tratamiento, las instalaciones de radioterapia se encuentran a un costado de los complejos hospitalarios. La sala de tratamiento, en la cuál está ubicado el acelerador, también puede recibir el nombre de *búnker*.

1. Barreras

La cantidad de blindaje necesario en cada una de las barreras del búnker de tratamiento, dependerá del uso de las áreas circundantes. Las áreas con altos niveles de ocupación requerirán un mayor blindaje. Cabe mencionar que, cuando el acelerador está irradiando, el POE está afuera del cuarto de tratamiento, por lo que el blindaje lo protege.

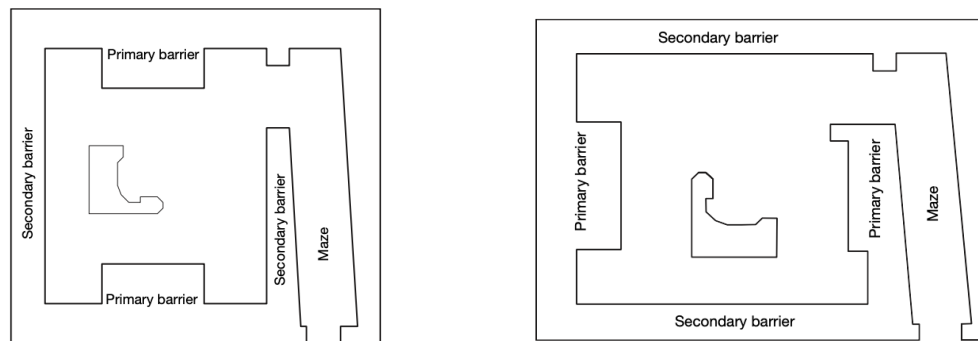
El búnker de tratamiento debe estar rodeado de habitaciones que tengan una ocupación baja o controlada. Como se mencionó anteriormente, el acceso a estas salas debe ser restringido y controlado. Para los pacientes, se recomienda que estos entren en sillas de rueda o en camillas.

Para determinar el espesor de la barrera, para alcanzar los límites de dosis, es necesario estimar

la carga de trabajo de la unidad de radiación y conocer la tasa de dosis a la que funciona la unidad de tratamiento.

2. Laberintos

Para la entrada de la sala, se debe pasar por una puerta blindada, o bien, vía un laberinto. Un laberinto es un pasillo largo con una pequeña sección transversal, incorporado en el diseño de estas salas, el cuál conduce a la habitación donde se encuentra el acelerador; el uso de este laberinto es para reducir la dosis de radiación cerca de la entrada, asegurando que la radiación de fotones solo pueda salir de la habitación después de que la dispersión se haya atenuado. En la entrada de este laberinto, se encuentra una barrera que limita el acceso durante las exposiciones. En caso que se requiera una barrera blindada, puede ser necesario una puerta motorizada. El diseño de un laberinto en un centro de radioterapia está ilustrado en la Figura [7.4](#)



(a) Eje de rotación del gantry es paralelo al eje del laberinto

(b) Eje de rotación del gantry es perpendicular al eje del laberinto

Figura 7.4: Estructura del cuarto de tratamiento para los laberintos [\[13\]](#)

El conocimiento de la dispersión de los rayos X por los pacientes y paredes del cuarto, es requerida cuando se diseña el laberinto. Para rayos X que operan menor a 10 MV, se debe considerar la dispersión y transmisión de radiación directa, dispersa (paciente) y de fuga (cabezal). Para rayos X que operan mayor a 10 MV, la fluencia de neutrones debe ser considerada.

Una puerta motorizada debe tener un medio manual para abrir la puerta en caso de falla eléctrica o mecánica. También debe haber un medio de emergencia por el cual se detenga el movimiento de la puerta [\[13\]](#). Todas las puertas deben estar entrelazadas con la unidad de tratamiento, de esta manera, se previene la exposición si la puerta está abierta, dando instrucciones automáticas que la irradiación debe ser detenida inmediatamente. Cabe mencionar que, cuando la puerta es cerrada, la salida de radiación del dispositivo no debe reanudarse automáticamente.

3. Materiales

Los materiales más usados para el blindaje de radiación son el cemento, acero y plomo. Dado que el cemento es el material menos caro, se convierte automáticamente en el material de elección para construir los blindajes. La densidad del cemento varía conforme la cantidad que se agregue a la mezcla. Para las instalaciones que operan con más de 500 kV, la absorción de Compton domina y el blindaje del material absorberá la radiación según la densidad de dicho material. En la Tabla [7.1](#) se muestra un listado de los materiales que se usan para la construcción, con su respectiva densidad.

4. Área de control

Tabla 7.1: Materiales de construcción para blindajes [13]

<i>Material de construcción</i>	<i>Densidad [kg/m³]</i>	<i>Observaciones</i>
Cemento	2,350	Varía con el contenido de minerales
Ladrillos de arcilla	1,600	Puede utilizarse para instalaciones de hasta 500 kV con blindaje suplementario de plomo o acero
Relleno de tierra	1,600	Es útil para búnkers que se encuentran debajo del suelo
Acero	7,900	Se usa normalmente como material complementario
Plomo	11,340	Es un material complementario para el blindaje de un cuerpo existente de tratamiento

En el área de control del tratamiento, se controla la máquina por medio de una consola. Esta área está cercana a la entrada del búnker; esta debe ser suficientemente grande para posicionar la consola y el equipo asociado. Es importante mencionar que, cuando el acelerador irradia, el personal se encuentra en el área de la consola (no adentro con el paciente). En esta área, también se encuentra terminales de computadora para registro y verificación del tratamiento, sistema de información hospitalaria y equipo de dosimetría, así como monitores de TV de circuito cerrado para la observación del paciente. Debe haber un acceso libre a cualquier conducto de dosimetría.

En la sala de control se monitorea al paciente por medio de unas cámaras situadas a 15° por encima del eje de rotación del gantry [13]; de esta manera, se logra una observación optima del paciente y de la camilla de tratamiento. Estas cámaras deben encontrarse alejadas de la fuente de radiación para minimizar la degradación de la imagen receptor por la dispersión de la radiación.

5. Iluminación de la sala

Las luces de la sala de tratamiento deben ser regulables, para que la luz de campo de la unidad de tratamiento y los láseres de alineación, se puedan ver fácilmente. Estas luces y láseres pueden ser monitoreados desde la sala de control del búnker.

Cuando se enciende la luz de campo, las luces de la habitación deben atenuarse a un nivel preestablecido (pero variable) y los láseres de alineación también deben encenderse. La iluminación de la sala de tratamiento puede ser con luces fluorescentes, las cuales deben apagarse cuando se enciende la luz de campo; las luces incandescentes de la sala se usan para el nivel de atenuación. Cuando se apaga la luz de campo, se enciende la iluminación de la sala de tratamiento y se apagan los láseres. Las luces regulables pueden permanecer encendidas en todo momento.

En total, se recomienda usar cuatro láseres de alineación. Tres láseres proyectando una cruz: dos alineados con las posiciones del gantry de 90° y 270°, y uno colocado en el techo, directamente encima del isocentro [13]. El cuarto láser debe proyectar una línea sagital a lo largo del eje del gantry. Este láser, generalmente se coloca en un soporte con ángulo en la pared opuesta al gantry.

6. Conductos

Los conductos se refieren a los cables necesarios para el control de la unidad de tratamiento, a los conductos de ventilación y calefacción, conductos para el equipo físico y otros servicios. Estos conductos deben estar adecuadamente blindados entre la sala de tratamiento y el exterior.

Los conductos deben colocarse de tal manera que la radiación que pasa a través de ellos, requiera la menor cantidad de compensación por el material de la barrera que desplaza. Ningún conducto debe atravesar ortogonalmente una barrera de radiación. Este puede tener una o más curvas, de tal modo que la longitud total del conducto sea mayor al grosor de la barrera contra la radiación. Los cables del acelerador generalmente se colocan por debajo del nivel del piso (debajo de las barreras primarias o secundarias), antes de doblarse para llegar al área de control de tratamiento. Siempre que no haya salas o cuartos debajo de estos cables, generalmente no se requiere blindaje adicional a menos que el área de control de tratamiento esté directamente detrás de una barrera primaria, y el cable pase por debajo de la misma barrera primaria.

La cantidad de protección necesaria depende de la energía del haz de radiación, la distribución de la sala de tratamiento y la ruta de los conductos. El blindaje debe evaluarse cuidadosamente si los conductos deben atravesar la barrera primaria. La ubicación recomendada de estos conductos, es sobre un techo falso a lo largo del camino del laberinto, o cerca de la puerta del laberinto externo donde el flujo de fotones y/o neutrones es menor.

Introducción a la estadística circular

La estadística circular es una rama de la estadística que trata con datos que pueden ser representados por puntos alrededor de un círculo unitario; este tipo de datos recibe el nombre de *datos circulares*. Existe una variedad de ejemplos de los datos circulares, entre los cuales se destaca la medición de la dirección del viento, los ciclos biológicos, la cantidad de veces que ocurre un ciberataque en un centro de inteligencia, la incidencia de la caída de rayos eléctricos a lo largo del año, etc.

Los datos circulares provienen de variables direccionales, las cuales se caracterizan por no tener un cero absoluto y cuya selección de valores máximos y mínimos es arbitrario. Cabe mencionar que no siempre los datos circulares son inicialmente medidos como circulares, i.e., no son medidos como ángulos; un ejemplo ilustrativo de esto es, considere el tiempo de un día medido en un reloj de 24 horas. La hora 0:00 y 24:00 equivalen al mismo punto. Cada hora corresponde a una posición dentro del círculo unitario, en el cuál los datos pueden ser transformados a ángulos. En este caso, si se desea definir los ángulos expresados en grados el factor de conversión sería la hora del día por $360/24$. En la estadística circular, cada ángulo define un punto en la circunferencia del círculo unitario. Análogamente sucede lo mismo para los datos lineales, los cuales definen un punto en la recta real. Dada la naturaleza de la periodicidad de los datos circulares, se debe abandonar las técnicas de estadística para datos lineales y se deben construir nuevas técnicas que sean análogas para los datos circulares.

8.1. Estadística descriptiva circular

La forma más natural de representar las observaciones circulares de forma gráfica, es por medio de un punto en un círculo; este círculo puede representar un reloj de 24 horas, un compás o los meses del año. Por cuestiones de simplificación, se considera el radio del círculo como $r = 1$; por esta elección, cada observación se define como un vector unitario \vec{x} que va desde el centro del círculo hasta la observación.

Una vez se elige un origen y una orientación, se define el ángulo θ , el cuál representa la observación circular. Los valores negativos de θ corresponden a ángulos en la dirección opuesta según la orientación que se defina. Para estandarizar la representación de θ , se considera que este está medido

en radianes, cuyo origen comienza en el eje horizontal derecho del círculo. En este caso, se dice que θ es módulo 2π , dado que $\theta + 2n\pi$ representa el mismo punto dentro del círculo. Por esta elección de unidades, origen y orientación, el vector unitario \vec{x} se define como

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

Para la simplificación matemática, se decide representar el vector \vec{x} en el plano de los complejos; el eje horizontal representa la componente real y el eje vertical, la componente imaginaria. Con esto, entonces (8.1) puede representarse como un número complejo de la siguiente manera

$$z = e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (8.2)$$

El punto descrito por (8.2) puede ser visualizado por su representación gráfica en la Figura 8.1. Para la estadística descriptiva circular, se consideran aquellas herramientas estadísticas que describen y resumen una muestra de datos circulares, comenzando primero por las medidas de centralización seguido de las medidas de dispersión.

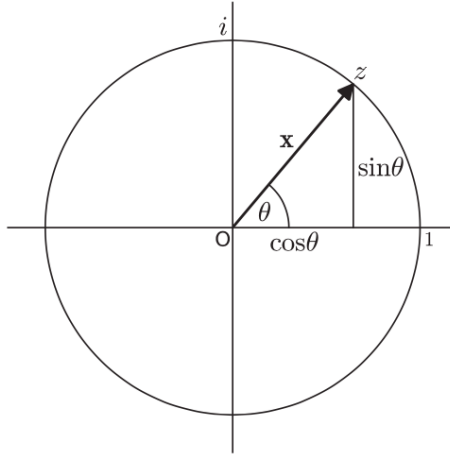


Figura 8.1: Representación gráfica de la observación circular en el plano complejo, cuyo vector unitario está representado por \vec{x} . [21]

8.1.1. Medidas de centralización

Las medidas de centralización se caracterizan por reducir la información de la muestra a un solo valor, siendo de esta manera un valor representativo de la muestra (ya que depende de la distribución que tengan los datos). Para empezar con las medidas de centralización, se define primero el momento muestral trigonométrico.

Considere una muestra aleatoria con n observaciones circulares, asociada a un conjunto de vectores unitarios $\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n$ y con ángulos $\theta_1, \dots, \theta_n$. Se define el k -ésimo momento muestral trigonométrico con $p \geq 0$ sobre la dirección cero como

$$t_{k,0} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j^k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\cos k\theta_j + i \sin k\theta_j) = x_k + iy_k \quad (8.3)$$

en donde claramente se observan las siguientes características: $x_{-k} = x_k$, $y_{-k} = -y_k$ y $t_{0,0} = 1$, ya que

$$x_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos k\theta_j, \quad y_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sin k\theta_j \quad (8.4)$$

Se define la dirección de este vector como

$$\bar{\theta}_k = \arctan\left(\frac{y_k}{x_k}\right) \quad (8.5)$$

La ecuación (8.5) recibe el nombre de *ángulo medio*. El ángulo medio se considera como una de las mediciones de localización más usadas para datos circulares, la cual indica la orientación preferida de la muestra de las observaciones circulares. Para muestras unimodales que son casi simétricas, la ecuación (8.5) proporciona una buena medida de ubicación central.

8.1.2. Medidas de dispersión

Al considerar el número complejo como (8.3), se define la magnitud en el plano complejo como

$$\bar{R}_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \quad (8.6)$$

La ecuación (8.6) recibe el nombre de *longitud del vector medio* cuyo intervalo se define entre $0 \leq \bar{R}_k \leq 1$. La longitud del vector medio se considera como una de las mediciones más usadas para medir la concentración de muestras circulares unimodales. Cuando se tiene que $\bar{R} = 1$, es debido a que todos los vectores unitarios son idénticos (i.e., los datos muestrales están ubicados en el mismo punto en el círculo unitario). Por tanto, se puede decir que mientras más cercano a 1 sea el valor de \bar{R} , los datos están agrupados en torno a la dirección media. Cuando se tienen valores cercanos a 0, se debe a que los datos están distribuidos uniformemente alrededor del círculo o bien, se debe a que la datos muestran una estructura cíclica. Las muestras con tamaño uniforme de la forma $\theta_1, \dots, \theta_{n/2}, \theta_1 + \pi, \dots, \theta_{n/2} + \pi$, se obtiene que $\bar{R} = 0$ dado que los pares de vectores unitarios se cancelan entre sí.

Las medidas de dispersión más usadas son la *varianza circular* y la *desviación estándar circular*. La varianza circular, también conocida como varianza angular, se define como

$$V = 1 - \bar{R} \quad (8.7)$$

cuyo intervalo está entre $0 \leq V \leq 1$. Por otro lado, la desviación estándar circular se define como

$$\sigma = \sqrt{2 \ln \bar{R}} \quad (8.8)$$

definido en el intervalo de $0 \leq \sigma < \infty$. Para valores de V muy pequeños (muestras concentradas), la ecuación (8.8) se puede reescribir como

$$\sigma \approx \sqrt{2V} = \sqrt{2(1 - \bar{R})} \quad (8.9)$$

8.2. Otras herramientas estadísticas lineales

Como método de comparación de los resultados que se presentan en este trabajo, se decidió usar la herramienta de series de tiempo para comparar la direccionalidad que muestran los datos usando la estadística circular.

8.2.1. Series de tiempo

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones tomadas secuencialmente, en donde cada punto tiene un orden definido. Según su representación matemática, una serie de tiempo se puede definir por medio de un conjunto $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ en un intervalo de tiempo $t \in [t_o, t_f]$. Por tanto, se dice que un modelo de series de tiempo para x_t es una especificación de las distribuciones conjuntas de una secuencia de variables aleatorias en el tiempo. [12]

El modelo de una serie de tiempo x_t se puede considerar como una combinación de sus componentes de tendencia, estacionalidad y fluctuación aleatoria. Es posible descomponer estas tres componentes para analizar la serie de tiempo; esto se considera como un proceso en el cual se transforma la serie de tiempo a múltiples y diferentes series de tiempo. Para alcanzar una descomposición correcta, es importante decidir entre modelos aditivos o multiplicativos, ya que es un requisito para analizar la serie (e.g., se considera una descomposición multiplicativa si la magnitud de la estacionalidad aumenta conforme la serie de tiempo crece). Para una descomposición aditiva, el modelo para la serie de tiempo x_t se considera como

$$x_t = m_t + s_t + e_t \quad (8.10)$$

donde m_t es la componente de la tendencia, s_t la estacionalidad y e_t el error aleatorio en un tiempo t . La tendencia m_t se puede extraer si se suaviza la serie de tiempo por medio de un método común llamado «media móvil centrada» [1], que para retrasos de tiempo de $-a$ a a , se define como

$$m_t = \sum_{i=-a}^a \left(\frac{1}{2a+1} \right) x_{t+i} \quad (8.11)$$

Una vez se estima la tendencia, es posible estimar la componente estacional por medio de una sustracción de la forma siguiente

$$s_t = x_t - m_t \quad (8.12)$$

Sin embargo, se necesita promediar la estacionalidad de la ecuación (8.12) dado que contiene fluctuaciones aleatorias. Para ello, se suma la estacionalidad y luego, se divide por el periodo de dicha estacionalidad de la serie [1]. Para promediar la ecuación (8.12), primero se alimenta la serie de tiempo en una matriz; luego, se debe transformar la matriz para que cada columna contenga elementos del mismo periodo (mismo año, trimestre, bimestre, mes, etc) y finalmente, se promedia cada columna.

Para completar la descomposición final del modelo x_t , se estima la fluctuación aleatoria e_t por medio de la siguiente sustracción

$$e_t = x_t - s_t - m_t \quad (8.13)$$

La componente de error aleatorio se puede usar para detectar valores atípicos de la serie de tiempo. En conclusión, la descomposición de las series de tiempo se usa normalmente para remover la componente estacional. Con esto, se puede entender de mejor manera la tendencia de una serie de tiempo.

A continuación se presenta un ejemplo de una serie de tiempo y su descomposición. En la Figura 8.2a, se tiene el comportamiento temporal de la concentración de CO_2 en la atmósfera en el Observatorio de Mauna Loa. En este caso, se hace una descomposición de un modelo aditivo, ya que a simple vista se observa que la estacionalidad es uniforme. En la Figura 8.2b, se observa su descomposición en las componentes de tendencia, estacionalidad y fluctuación aleatoria.

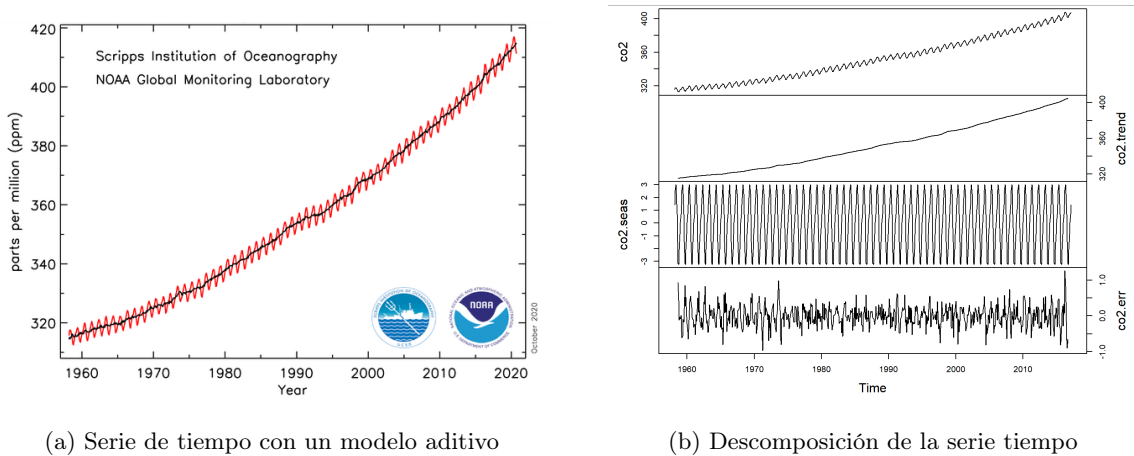


Figura 8.2: Ejemplo de una serie de tiempo y su descomposición, usando los datos de la concentración de CO_2 en la atmósfera en el Observatorio de Mauna Loa. [12]

8.2.2. Correlación de datos

Una correlación es un método de evaluación que mide la asociación entre dos o más variables. Por cuestiones del comportamiento de los datos que se usaron para este trabajo, se decidió usar la correlación de Kendall y es por ello que dicho método se detallará a continuación.

La correlación de Kendall, también llamada como *coeficiente tau de Kendall*, es un método no paramétrico que evalúa la correlación de dos variables que no necesariamente siguen una distribución normal; se usa para evaluar las similitudes en el orden de los datos cuando estos se clasifican por cantidades. Este método usa pares de observaciones y determina la intensidad de la asociación en función del patrón de concordancia y discordancia entre los pares. [18]

Sea n el tamaño de las observaciones de x y y , entonces el número de los posibles pares que se pueden formar son $n(n-1)/2$. Primero, se empieza a ordenar los pares colocando los valores de x . Luego, se verifica la concordancia de los pares:

- Si $(x_2 - x_1)$ y $(y_2 - y_1)$ tienen el mismo signo, entonces se consideran pares concordantes.
- Si $(x_2 - x_1)$ y $(y_2 - y_1)$ tienen signos diferentes, entonces se consideran pares discordantes.

Con esto, se define la distancia de la correlación de Kendall como

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{n(n-1)/2} \quad (8.14)$$

en donde n_c representa el número total de los pares concordantes y n_d el número de pares discordantes. El intervalo del coeficiente de correlación es de $\tau \in [-1, 1]$, por lo que:

- Si $\tau = -1$: Las variables tienen una correlación fuerte negativa (ver Figura 8.3a).
- Si $\tau = 0$: Las variables no tienen ninguna asociación entre ellas (ver Figura 8.3b).
- Si $\tau = 1$: Las variables tienen una correlación fuerte positiva (ver Figura 8.3c).

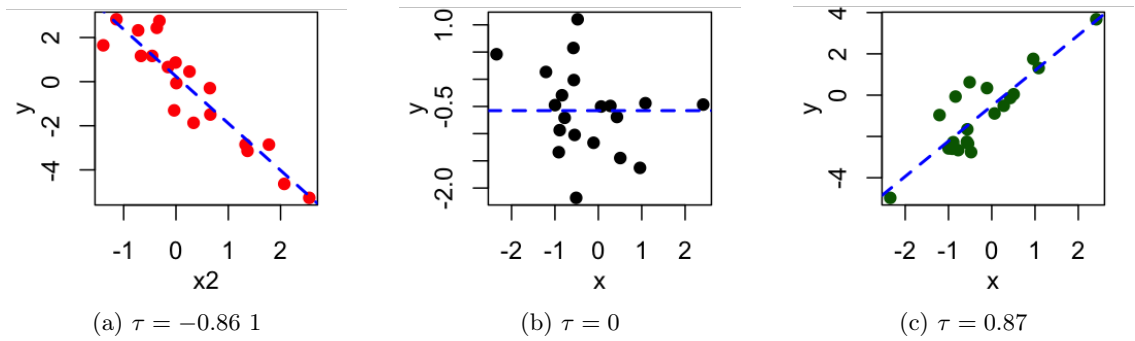


Figura 8.3: Interpretación del coeficiente de correlación. [29]

 Dosímetro personal: análisis de datos

Por cuestiones de privacidad de los datos de la muestra tomada de los trabajadores ocupacionalmente expuestos en la Clínica de Radioterapia La Asunción, se decidió crear una nomenclatura sencilla para poder hacer mención a los resultados que se obtuvieron para cada uno. La muestra se divide en cuatro grupos principales: médicos, físicos médicos (o personas que trabajan en esta área), técnicos e ingenieros. A continuación se presenta el proceso de la creación de dicha nomenclatura; el orden comienza de la columna izquierda a la columna derecha.

Tabla 9.1: Explicación de la creación de nomenclatura para la muestra

<i>Grupo</i>	<i>Código</i>	<i>Nombre</i>	<i>Apellido</i>	<i>Ejemplo</i>
La letra representativa de cada grupo es: M (médico), F (físico médico), T (técnico), I (ingeniero)	Es el mismo que se incluye en los archivos de excel (sin el guion y omitiendo el 238)	Inicial del primer nombre	Inicial del primer apellido	M03LU [†]

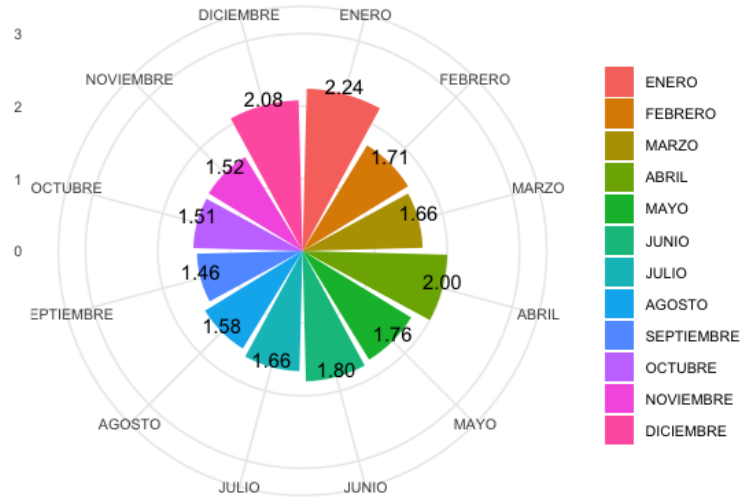
[†]Este código le corresponde al trabajador que pertenece al grupo de médico, con código 238-03, cuyas iniciales de su primero nombre y apellido son L y U, respectivamente

Para la muestra representativa, se decidió escoger 2 médicos, 1 físico médico, 1 técnico y 1 ingeniero. Con esto, se designaron las siguientes etiquetas para los trabajadores escogidos:

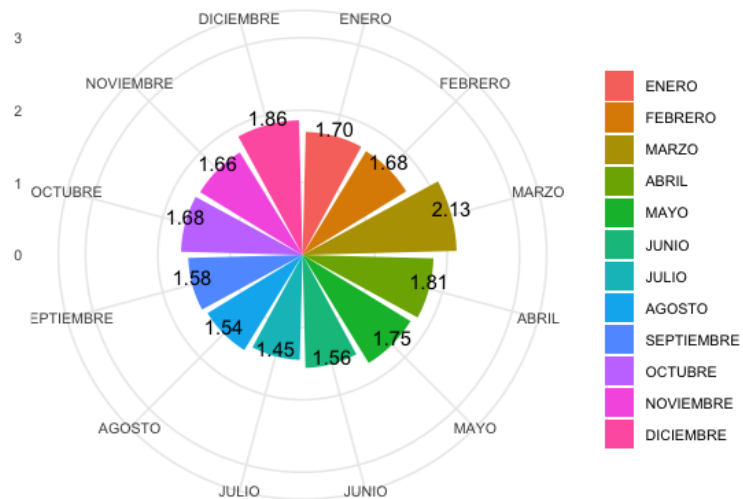
- Trabajador M03LU → Médico A
- Trabajador M05MO → Médico B
- Trabajador F04EH → Físico médico A
- Trabajador T01EE → Técnico A
- Trabajador I22CR → Ingeniero A

9.1. Resultados mensuales

El término *análisis explorativo* hace referencia a los resultados intactos (es decir, aquellos resultados que no tienen una aplicación de una herramienta estadística, como el cálculo del ángulo medio, la desviación estándar circular o bien, una transformación para las series de tiempo). Con esto, se tuvo que los resultados del análisis explorativo de los datos mensuales de los médicos fue el siguiente:



(a) Médico A



(b) Médico B

Figura 9.1: Dosis acumulada de cada mes desde el 2010-2019 para a) el médico A y b) el médico B.

Para el médico A (Figura 9.1a), se observa que hay tres meses con mayor dosis acumulativa a lo largo de los últimos 10 años, siendo enero el mayor de los tres con 2.4 mSv. Para el médico B (Figura 9.1b), se observa que solo hay un mes destacado, siendo este el mes de marzo con 2.13 mSv.

Se obtuvo que el ángulo medio del médico A fue de $\bar{\theta} = 0.175$ mSv y $\bar{\theta} = 0.170$ para el médico B, con una longitud media de $\bar{R} = 0.998$ para ambos, indicando de esta manera que los puntos muestrales se encuentran en el mismo punto del círculo unitario (i.e., los datos están muy concentrados). Por último, los datos de la dosis acumulada para el médico A fue de $\delta = 0.07$ y $\delta = 0.06$ para el médico B.

Los resultados de los otros grupos (físico médico, técnico e ingeniero) se muestran en la Figura 9.2. Para el físico médico A, se observa solo hay un mes con más tendencia en la dosis, siendo este en diciembre con 2.30 mSv. Para el técnico A, el mes con más dosis le corresponde a enero, con 2.06 mSv. Por último, para el ingeniero A, se muestra que hay dos meses con más dosis, siendo enero y julio con 1.98 mSv y 1.84 mSv, respectivamente.

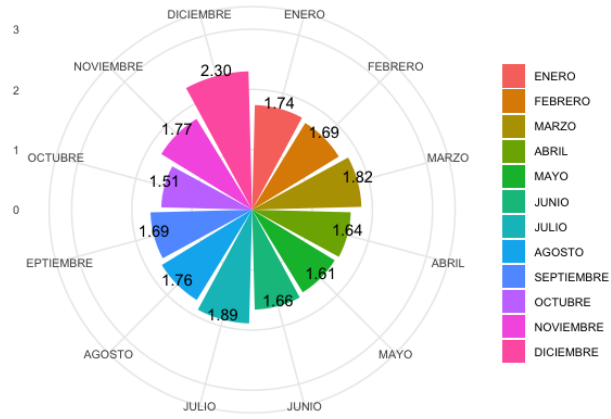
Se obtuvo que el ángulo medio para el físico médico A fue de $\bar{\theta} = 0.176$; para el técnico A fue de $\bar{\theta} = 0.172$; para el ingeniero fue de $\bar{\theta} = 0.161$. Para los tres, la longitud media fue la misma, siendo esta de $\bar{R} = 0.998$, mostrando el mismo resultado que se obtuvo para los médicos. Con respecto a la desviación estándar, se tuvo un resultado de $\delta = 0.065$ para el físico médico A, $\delta = 0.069$ para el técnico A y $\delta = 0.059$ para el ingeniero A.

Con el fin de observar si hay algún mes con más tendencia en la que se obtiene una mayor cantidad de dosis acumulada, se decidió presentar en una tabla los resultados resumidos acerca del mes con más dosis acumulada para cada trabajador de la muestra, indicando la cantidad respectiva.

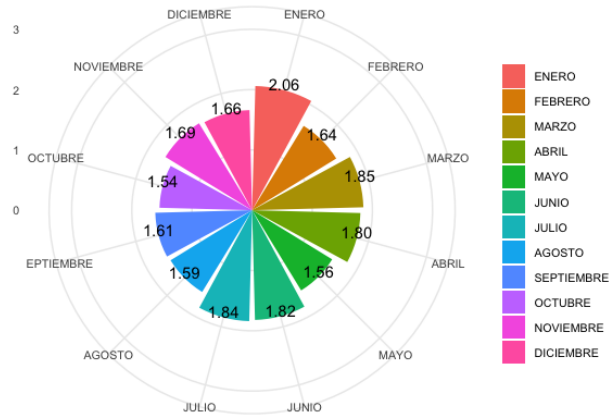
Tabla 9.2: Resumen de los resultados mensuales de cada trabajador de la muestra

<i>Trabajador</i>	<i>Mes con más dosis</i>	<i>Cantidad [mSv]</i>
<i>Médicos</i>		
Médico A	Enero	2.24
Médico B	Marzo	2.13
<i>Físico médico</i>		
Físico médico A	Diciembre	2.30
<i>Técnico</i>		
Técnico A	Enero	2.06
<i>Ingeniero</i>		
Ingeniero A	Enero	1.98

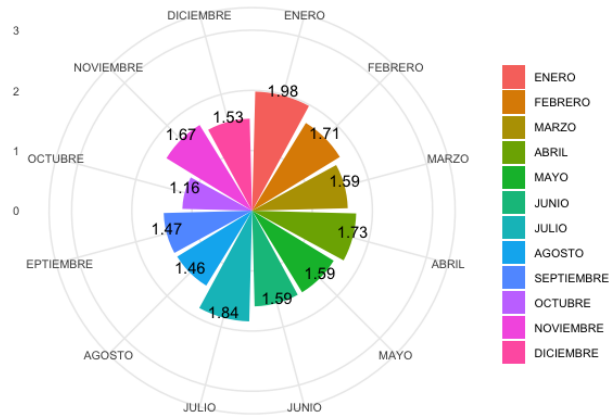
Asimismo, se presenta en una tabla todos los resultados de la estadística descriptiva de cada trabajador de la muestra. Para medir la concentración de los datos, se usó la ecuación (8.6) cuyos resultados se ven reflejados en la segunda columna de la Tabla 9.3. Para observar la dispersión de los datos, se usó la ecuación (8.9), donde los resultados se observan la última columna de dicha tabla.



(a) Físico médico A



(b) Técnico A



(c) Ingeniero A

Figura 9.2: Dosis acumulada de cada mes desde el 2010-2019 para el a) físico médico A, b) técnico A y c) ingeniero A.

Tabla 9.3: Estadística descriptiva circular para datos mensuales (2010-2019)*

<i>Trabajador</i>	<i>Mes con más dosis</i>	$\bar{\theta}$	\bar{R}	V	δ
<i>Médicos</i>					
Médico A	Enero	0.222	0.987	0.011	0.149
Médico B	Marzo	0.212	0.989	0.002	0.063
<i>Físico médico</i>					
Físico médico A	Diciembre	0.229	0.992	0.008	0.130
<i>Técnico</i>					
Técnico A	Enero	0.204	0.986	0.014	0.167
<i>Ingeniero</i>					
Ingeniero A	Enero	0.198	0.996	0.004	0.090

*Todos los datos incluidos en la Tabla 9.3 están con la dimensional respectiva a una dosis efectiva, siendo esta en mSv.

Dado los resultados mostrados en la Tabla 9.3, para todos los trabajadores de la muestra seleccionada, la desviación estándar circular de los datos de la dosis acumulada no se alejan tanto de la media, ya que el orden de magnitud está en 10^{-1} mSv. De esta misma manera, la longitud media indicó que los datos se encuentran bastante concentrados, con una varianza circular del orden de magnitud de entre 10^{-2} entre ellos.

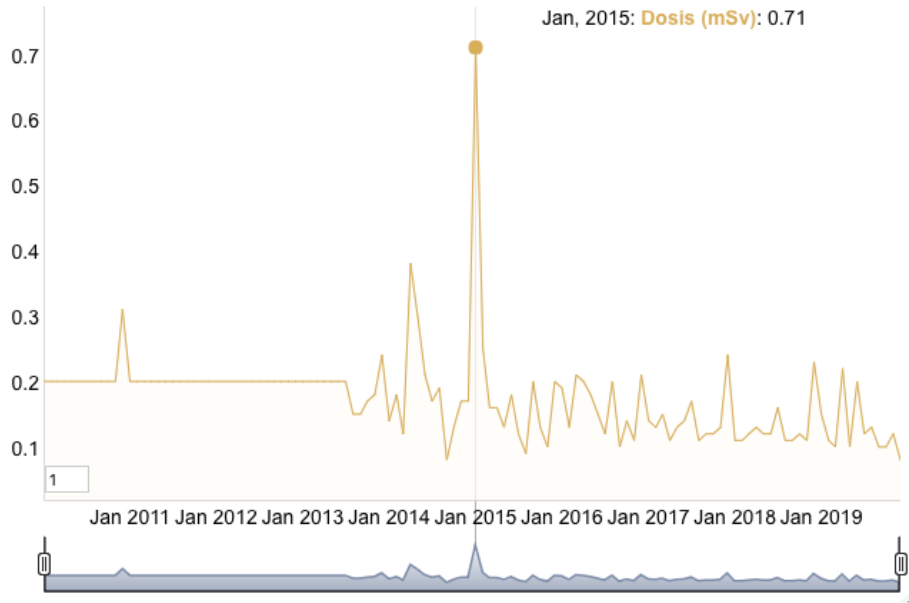
9.2. Resultados anuales

En esta sección de trabajo, se mostrarán los resultados obtenidos por las series de tiempo, incluyendo las gráficas de las series completas y las gráficas de la componente de estacionalidad; asimismo, se mostrarán los resultados de la estadística descriptiva circular, como método de verificación del Artículo 70 del Acuerdo Gubernativo Número 55-2001 [9].

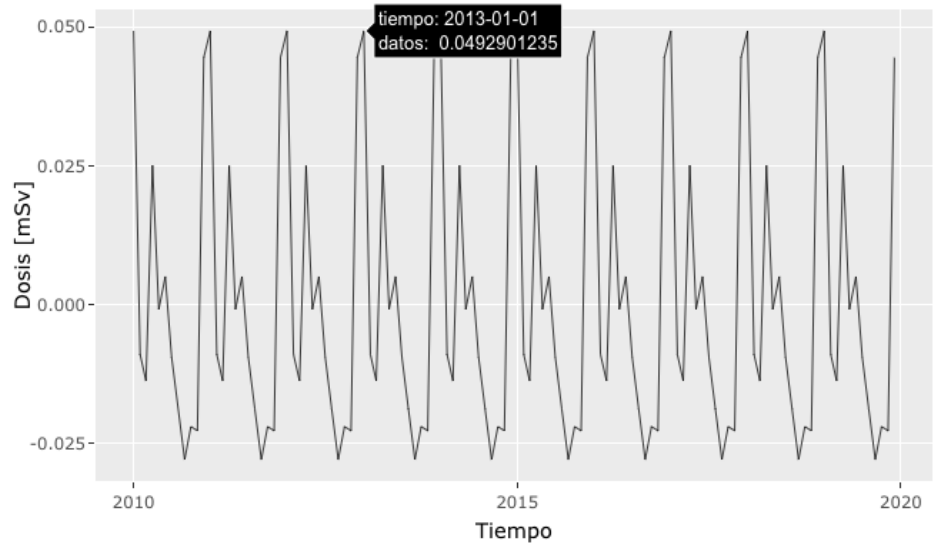
Como método de comparación de los resultados que se presentaron en la sección anterior, se decidió usar la herramienta de series de tiempo para comparar la direccionalidad que mostraron los datos en las Figuras 9.1 y 9.2. Es importante recordar que las series de tiempo muestran resultados generales de los datos anuales, más sin embargo, no de los datos mensuales.

Con esto, se usó la librería de *Time Series* del programa RStudio. Se graficó la serie de tiempo completa y su descomposición de la componente estacional. Para la serie de tiempo completa, se pudieron observar los datos atípicos de cada trabajador, con la dosis respectiva en ese tiempo. Luego, se descompuso la serie en sus tres componentes: tendencia, estacionalidad y fluctuaciones aleatoria. Dado que para este análisis se busca identificar la direccionalidad de los datos, solamente se usaron los datos de la componente de estacionalidad; cabe mencionar que, para los gráficos de esta componente, los datos atípicos son sensibles al algoritmo implementado por la librería de RStudio.

Comenzando con el médico A, según la Figura 9.3a, el dato atípico se encuentra en el mes de enero de 2015, con una dosis registrada de 0.71 mSv; a simple vista se puede observar que los datos no presentan una tendencia alguna, ya que la serie no crece con respecto al tiempo, sino que se mantiene constante. La descomposición de esta serie se muestra en la Figura 9.3b. Lo interesante a resaltar es que muestra que cada enero, hay un pico de dosis. Como se mencionó anteriormente, esta componente se ve muy afectada por los datos atípicos y solo sirve para mostrar el panorama general de la estacionalidad de los datos. En este caso, coincide con el resultado de la Figura 9.1a, donde la preferencia de la direccionalidad de los datos se ve que sucede en enero.



(a) Serie de tiempo completa

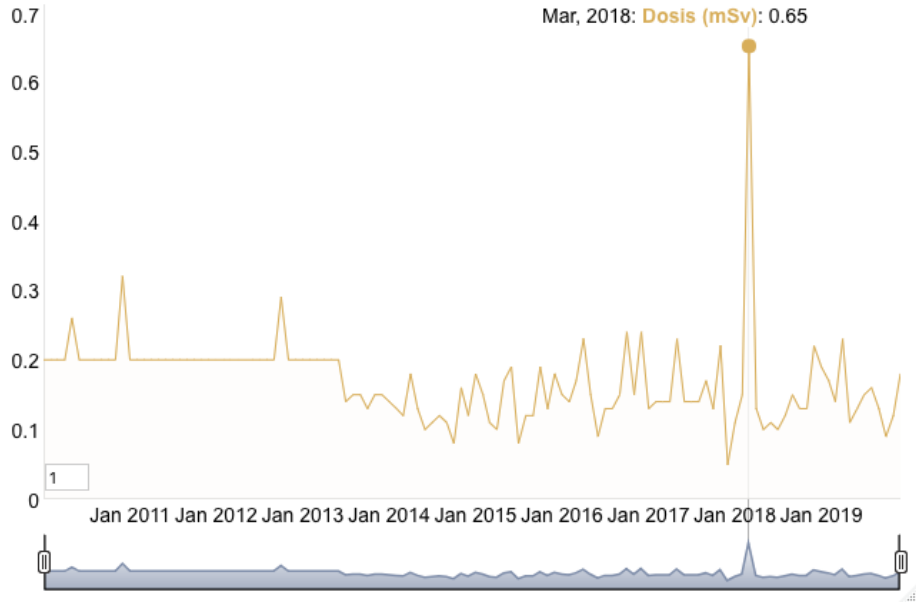


(b) Descomposición de la componente estacional

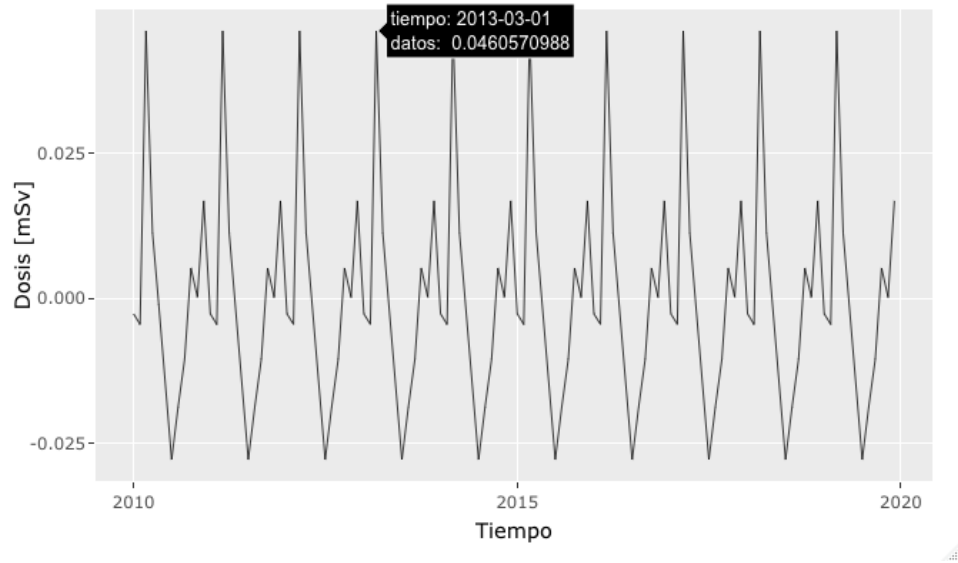
Figura 9.3: Serie de tiempo para el médico A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.

Según la Figura 9.4a para el médico B, el dato atípico se encuentra en el mes de marzo de 2018, con una dosis registrada de 0.65 mSv. La serie no presenta una tendencia aditiva o multiplicativa, ya que no crece con respecto al tiempo, sino que se mantiene constante. La descomposición de esta serie se muestra en la Figura 9.4b; esta gráfica indica que cada marzo, hay un pico de dosis. Esto coincide con el resultado de la Figura 9.1b donde la preferencia de la direccionalidad de los datos se ve que sucede en marzo.

Para el físico médico A, el dato atípico se encuentra en el mes de diciembre de 2010, con una dosis



(a) Serie de tiempo completa

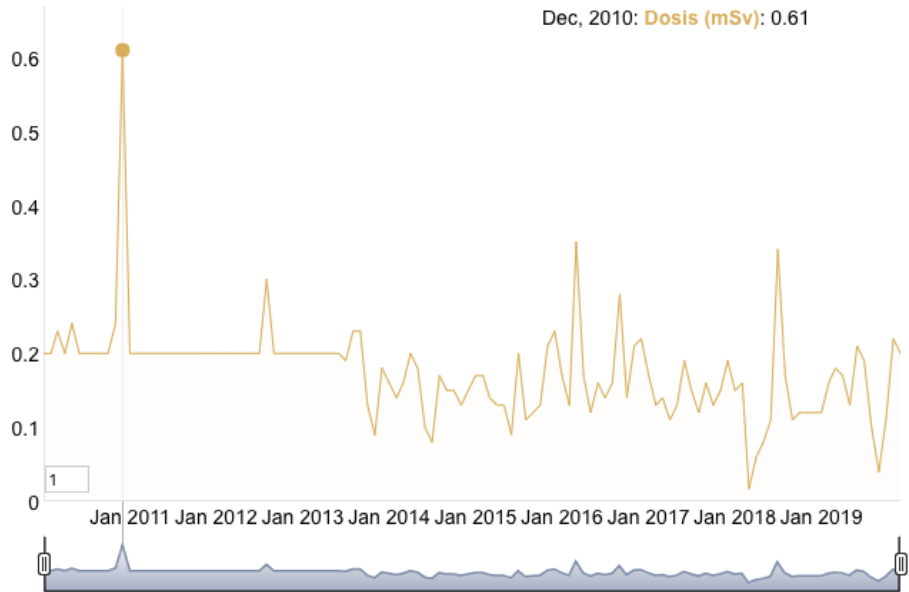


(b) Descomposición de la componente estacional

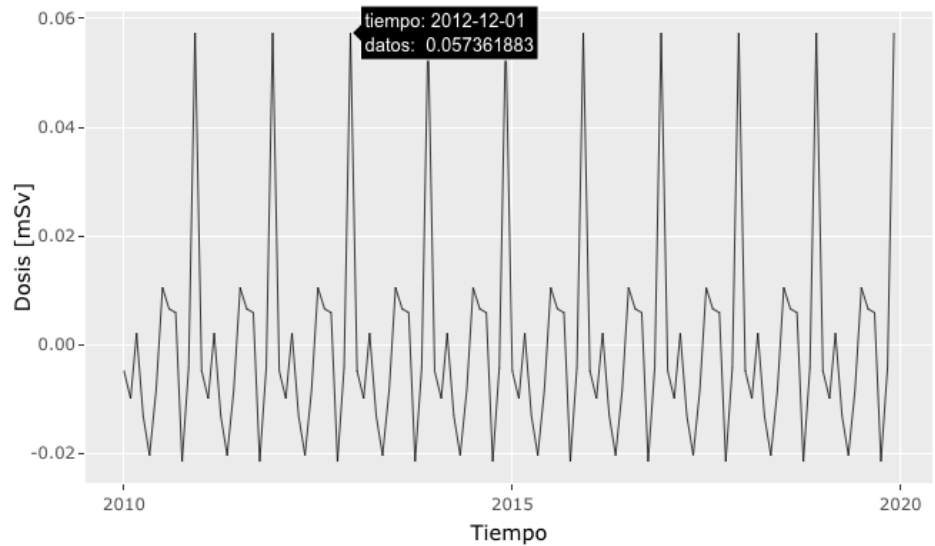
Figura 9.4: Serie de tiempo para el médico B. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.

registrada de 0.61 mSv, según como se muestra en la Figura 9.5a. La serie se mantiene constante ya que no presenta una tendencia aditiva o multiplicativa y no crece con respecto al tiempo. La descomposición de esta serie se muestra en la Figura 9.5b; esta gráfica indica que cada diciembre, hay un pico de dosis. Esto coincide con el resultado de la Figura 9.2a donde la preferencia de la direccionalidad de los datos se ve que sucede en diciembre.

Según la Figura 9.6a para el técnico A, el dato atípico se encuentra en el mes de enero de 2012, con una dosis registrada de 0.68 mSv. La serie no presenta una tendencia aditiva o multiplicativa,



(a) Serie de tiempo completa

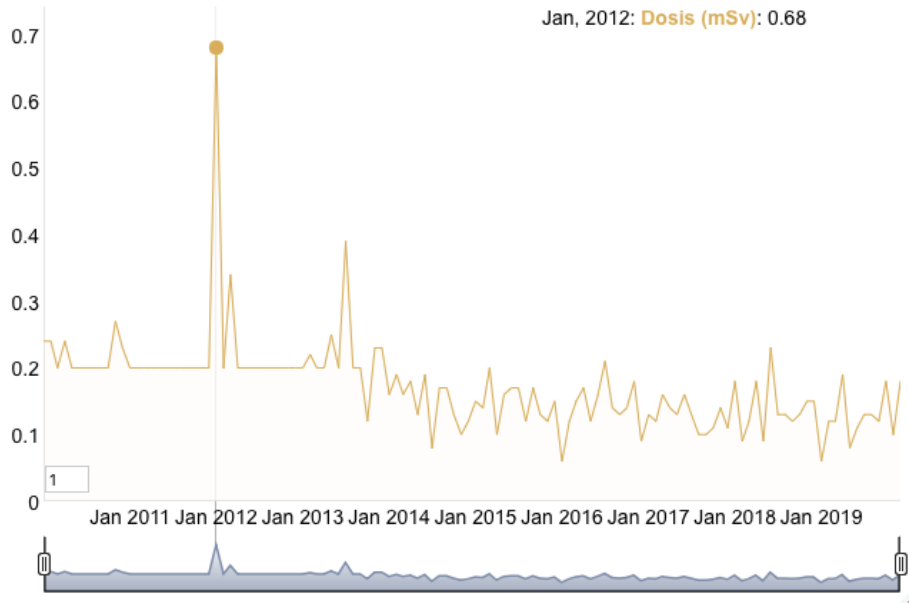


(b) Descomposición de la componente estacional

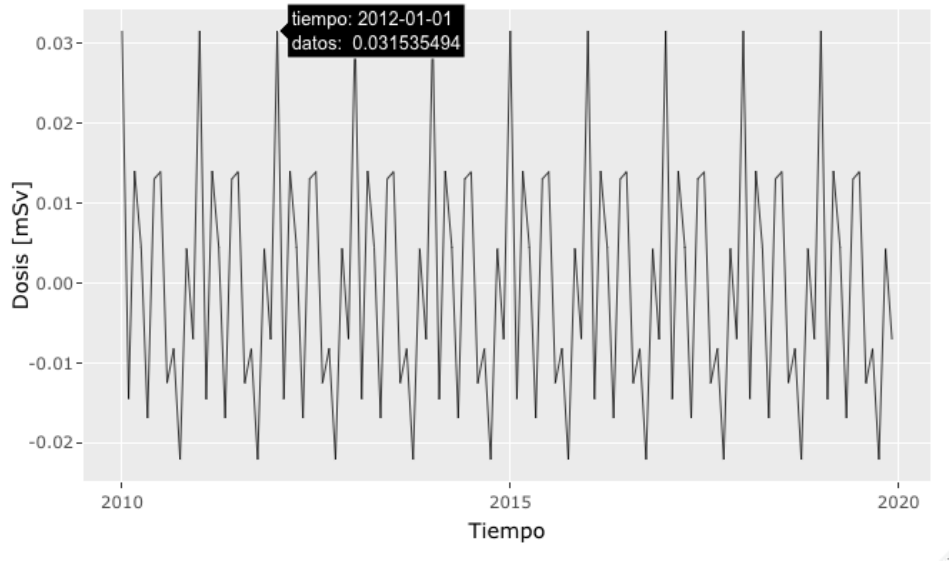
Figura 9.5: Serie de tiempo para el físico médico A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.

no crece con respecto al tiempo y que se mantiene constante. La descomposición de esta serie se muestra en la Figura 9.6b; esta gráfica indica que cada enero, hay un pico de dosis. Esto coincide con el resultado de la Figura 9.2b, donde la preferencia de la direccionalidad de los datos se ve que sucede en enero.

Para el ingeniero A, el dato atípico se encuentra en el mes de enero de 2016, con una dosis registrada de 0.45 mSv, según como se muestra en la Figura 9.5a. Esta dosis es aproximadamente 0.20 mSv menos que la dosis registrada para los otros trabajadores. La serie se mantiene constante ya



(a) Serie de tiempo completa

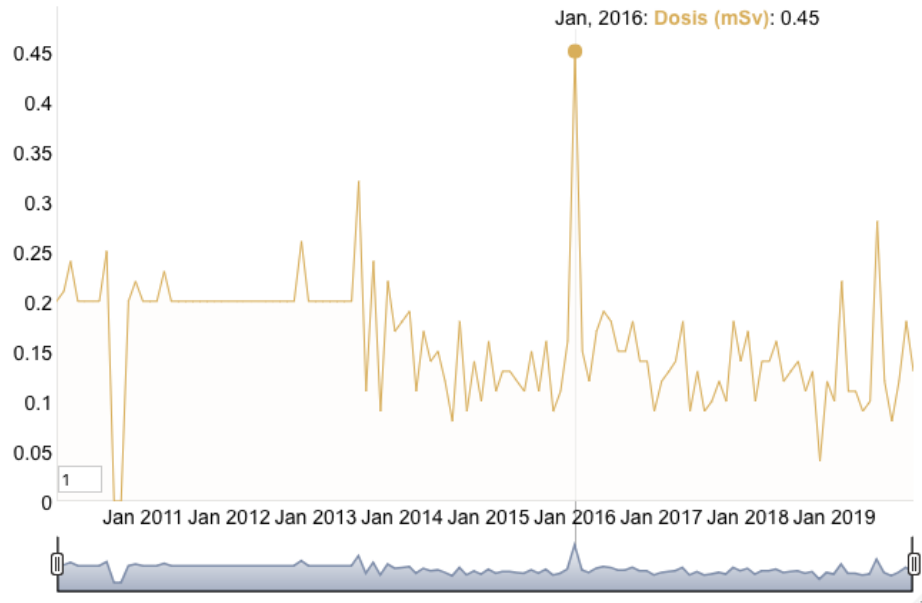


(b) Descomposición de la componente estacional

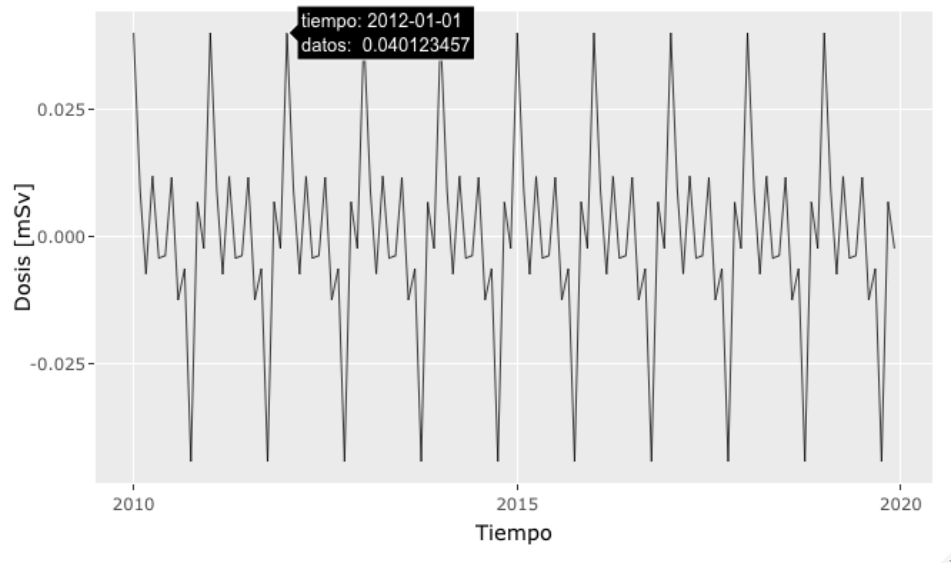
Figura 9.6: Serie de tiempo para el técnico A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.

que no presenta una tendencia aditiva o multiplicativa. La descomposición de esta serie se muestra en la Figura 9.7b; esta gráfica indica que cada enero, hay un pico de dosis. Esto coincide con el resultado de la Figura 9.2c, donde la preferencia de la direccionalidad de los datos se ve que sucede en enero.

Con los resultados presentados, se debe mencionar que no todos los trabajadores muestran el mismo patrón y no todos muestran el mismo pico en el mismo año o en el mismo mes, a pesar de laborar en la misma clínica.



(a) Serie de tiempo completa



(b) Descomposición de la componente estacional

Figura 9.7: Serie de tiempo para el ingeniero A. Se muestra la dosis acumulada [mSv] desde enero del 2010 hasta diciembre de 2019.

A continuación se presenta un resumen de la estadística descriptiva circular de los datos anuales (ver Tabla 9.4). Estos corresponden a los años de 2015 al 2019; la razón de esta selección se debe a lo establecido según el Artículo 70 del Acuerdo Gubernativo Número 55-2001, el cual hace mención al límite de dosis anual para un trabajador ocupacionalmente expuesto. Con esto, se debe saber que la dosis efectiva en promedio no debe sobrepasar de 20 mSv por año, en un periodo de cinco años consecutivos (en otras palabras, en cinco años, la suma de la dosis efectiva del trabajador expuesto a radiación ionizante no debe ser más de 100 mSv). Es por ello que la atención se centra en las primeras dos columnas de la tabla referenciada al inicio de este párrafo: para todos los trabajadores,

la suma de la dosis no sobrepasa de 10 mSv. Estos datos son mucho menores al límite de 100 mSv; por otro lado, el promedio de la dosis anual permanece debajo del límite de 2 mSv.

Estos resultados muestran que, efectivamente, la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la Clínica de Radioterapia La Asunción cumplen con el límite de dosis anual según el Artículo 70 del Acuerdo Gubernativo Número 55-2001.

Tabla 9.4: Estadística descriptiva circular para datos anuales (2015-2019)⁺

<i>Trabajador</i>	<i>Mes con más dosis</i>	$\bar{\theta}$	V	δ	<i>Suma anual</i>
<i>Médicos</i>					
Médico A	Enero	0.26	0.03	0.23	9.14
Médico B	Marzo	0.24	0.02	0.20	9.36
<i>Físico médico</i>					
Físico médico A	Diciembre	0.19	0.00	0.04	9.24
<i>Técnico</i>					
Técnico A	Enero	0.12	0.00	0.05	8.20
<i>Ingeniero</i>					
Ingeniero A	Enero	0.20	0.01	0.13	8.31

⁺Todos los datos incluidos en la Tabla 9.4 están con la dimensional respectiva a una dosis efectiva, siendo esta en mSv.

9.3. Correlación de datos

Para verificar la dependencia de la variable de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo, se usaron los datos del total de sesiones al mes (2015 al 2019) por 2.20 Gy (promedio de dosis administrada en cada sesión).

La prueba de correlación necesita de la validación de las asunciones de los datos y para ello, fue necesario hacer pruebas preliminares. En primer instancia, se realizó una prueba de normalidad. Fue necesario hacer una inspección visual de los datos usando gráficos Q-Q. Estos gráficos son una herramienta visual que ayuda a evaluar si un conjunto de datos proviene de alguna distribución teórica (en este caso, una distribución normal); si los datos se comportan como una distribución normal, los puntos se posicionan sobre la recta de 45°. Como se observa en la Figura 9.8, para los datos de la dosis administrada en el total de sesiones, se muestra que los datos se comportan bastante bien sobre la recta; sin embargo, para los datos de la dosis personal anual, hay un punto atípico que está muy alejado de la recta.

Para corroborar estas gráficas, se hizo una prueba de Shapiro-Wilk. Esta prueba se puede realizar de la siguiente manera:

- *Hipótesis nula*: Los datos siguen una distribución normal.
- *Hipótesis alternativa*: Los datos no siguen una distribución normal.

Usando la función de `shapiro.test()` en RStudio, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. *Dosis administrada en el total de sesiones de 2015 al 2019*: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, se obtuvo que el valor de $p = 0.7059$. Dado que el valor de $p > \alpha$, no hay evidencia

suficiente para rechazar la hipótesis nula. De esta manera, se puede asumir la normalidad en los datos.

2. *Dosis personal anual del 2015 al 2019*: Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, se obtuvo que el valor de $p = 1.092 \cdot 10^{-12}$. Puesto que el valor de p es mucho menor que el nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula. Los datos de esta variable no siguen una distribución normal.

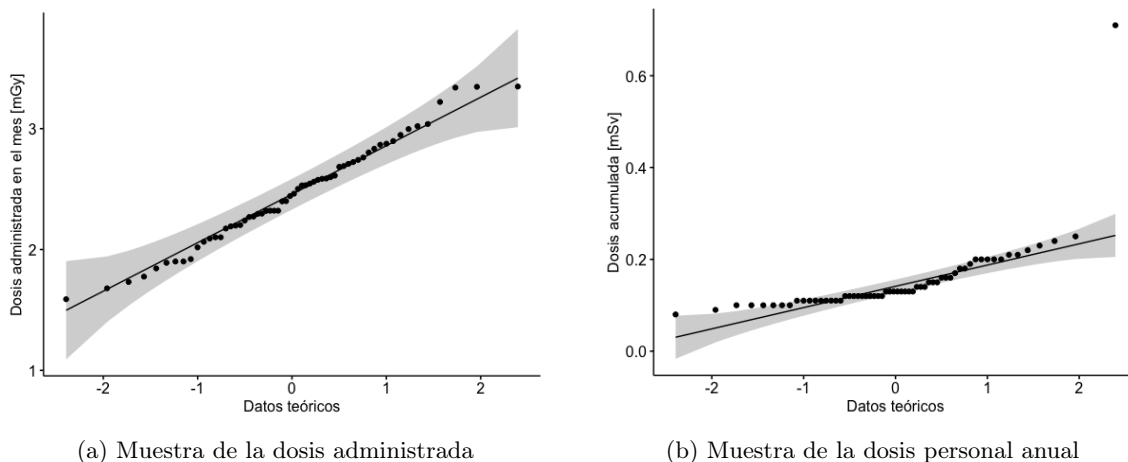


Figura 9.8: Gráfico Q-Q para verificar la normalidad de los datos

Dado que las dos variables no cumplieron con la prueba de normalidad, se decidió usar la prueba de correlación de Kendall. Esta prueba evalúa la correlación de dos variables que no necesariamente siguen una distribución normal. Para la prueba de correlación, se definen las siguientes hipótesis:

- *Hipótesis nula*: No hay correlación entre las variables ($H_0 : \rho = 0$)
- *Hipótesis alternativa*: Existe una correlación entre las variables ($H_1 : \rho \neq 0$)

Usando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, los resultados de la prueba de correlación para la muestra se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 9.5: Resultados de la prueba de correlación de Kendall

<i>Trabajador</i>	<i>Valor de p</i>	<i>¿Hay correlación?</i>	<i>Coficiente de correlación</i>
<i>Médicos</i>			
Médico A	0.34	No	-0.089
Médico B	0.32	No	-0.091
<i>Físico médico</i>			
Físico médico A	0.50	No	0.061
<i>Técnico</i>			
Técnico A	0.74	No	-0.031
<i>Ingeniero</i>			
Ingeniero A	0.95	No	-0.0053

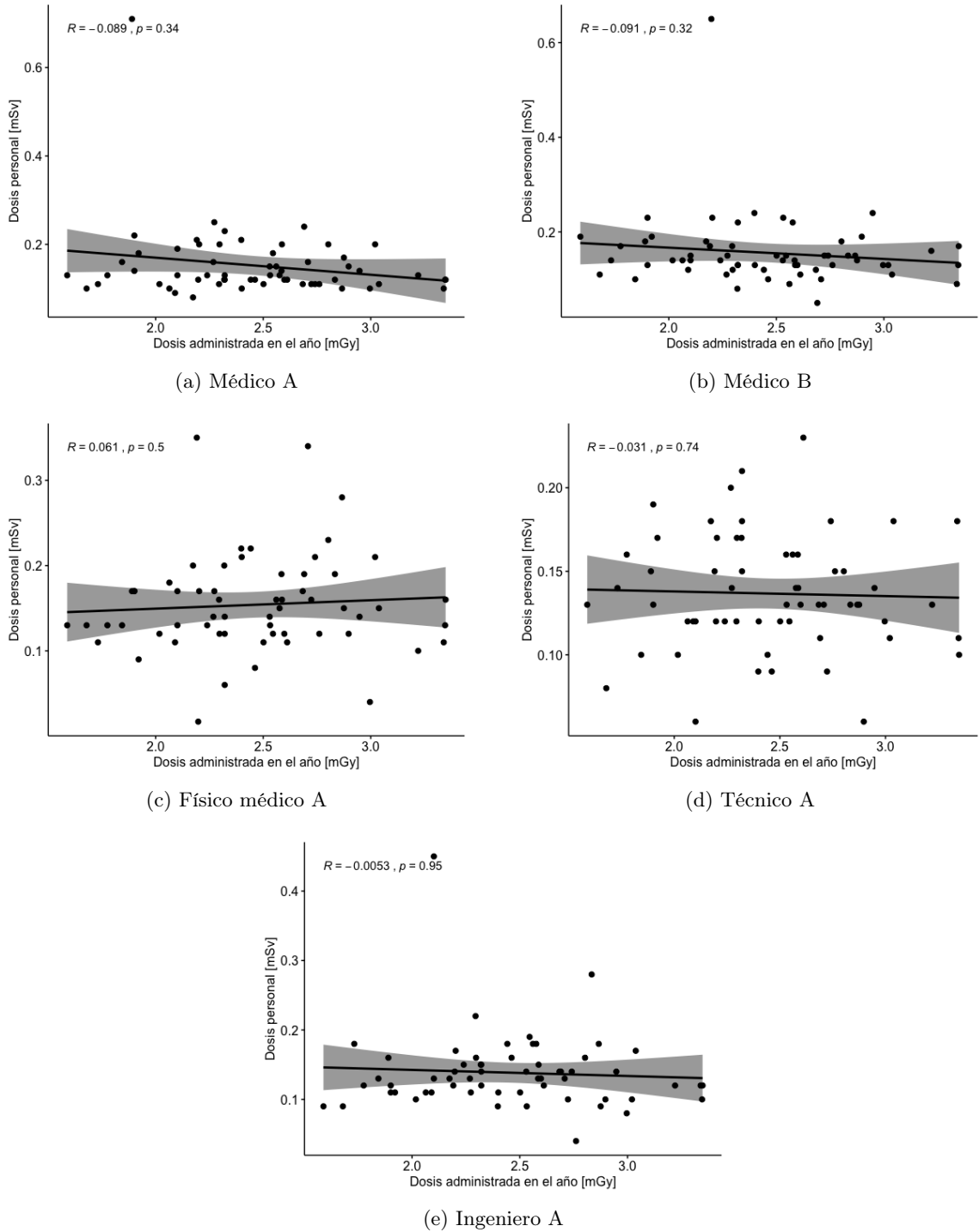


Figura 9.9: Correlación de la variable de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo para la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos.

Dado que todos los valores de p para cada trabajador fueron mayor al nivel de significancia, se concluye que no hay suficiente información para rechazar la hipótesis nula, la cual establece que no hay una relación lineal entre las dos variables.

9.4. Comparación de resultados con datos normalizados

Anteriormente, se mostraron los resultados de los datos originales, sin un factor que alterara el origen de estos. Sin embargo, se quiso volver a realizar los métodos discutidos anteriormente pero con los datos normalizados. Para esta normalización, se usaron los datos de la dosis administrada por mes en el isocentro:

$$\frac{\text{dosimetría personal}}{(2.20\text{mGy}) \cdot (\# \text{ de tratamientos administrados en un mes})} = \text{datos normalizados} \left[\frac{\text{mSv}}{\text{dosis en isocentro}} \right] \quad (9.1)$$

Dado que los datos de la dosis administrada por mes tiene registro desde mediados del 2014, se decidió usar los datos a partir del 2015 hasta el 2019 estuviesen anivelados. Con esta nueva modificación, se repitieron los métodos usados anteriormente para observar si había algún cambio con la tendencia y/o correlación. De los resultados que cambiaron su apariencia, fueron los datos de la componente estacional de la serie de tiempo y la correlación de datos; los demás permanecieron igual (gráfica circular y serie de tiempo completa).

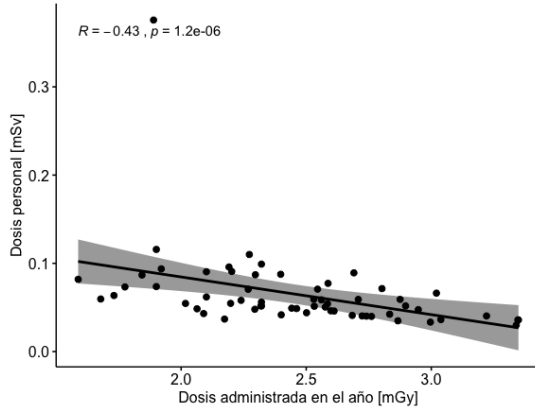
De los resultados de la correlación de datos, según la Figura [9.10](#), se obtuvo que sí existe una relación entre las variables normalizadas de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo para la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos. A continuación se presenta un resumen de los resultados de la correlación, indicando el valor de p y el coeficiente de correlación.

Tabla 9.6: Resultados de la prueba de correlación de Kendall con datos normalizados

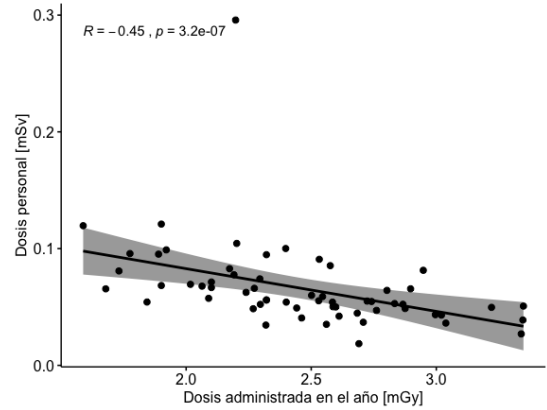
<i>Trabajador</i>	<i>Valor de p</i>	<i>¿Hay correlación?</i>	<i>Coficiente de correlación</i>
<i>Médicos</i>			
Médico A	$1.2 \cdot 10^{-6}$	Sí	-0.43
Médico B	$3.2 \cdot 10^{-7}$	Sí	-0.45
<i>Físico médico</i>			
Físico médico A	0.0017	Sí	-0.28
<i>Técnico</i>			
Técnico A	$1.8 \cdot 10^{-6}$	Sí	-0.42
<i>Ingeniero</i>			
Ingeniero A	$1.2 \cdot 10^{-5}$	Sí	-0.39

Para la muestra, según los resultados mostrados en la Tabla [9.6](#) se puede concluir que dado que el valor de p es mucho menor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se rechaza la hipótesis nula, la cuál indica que no hay correlación entre las variables. De este modo, se puede afirmar que sí existe relación entre las variables pero con un coeficiente relativamente bajo. No se puede concluir que el coeficiente de correlación indica una fuerte correlación negativa (cuando la dosis administrada en el mes incrementa, la dosis personal disminuye), o bien, que no hay ninguna asociación entre las variables, ya que en promedio, el coeficiente de correlación se encuentra en la mitad dentro del rango de $\tau \in [-0.2, -0.5]$.

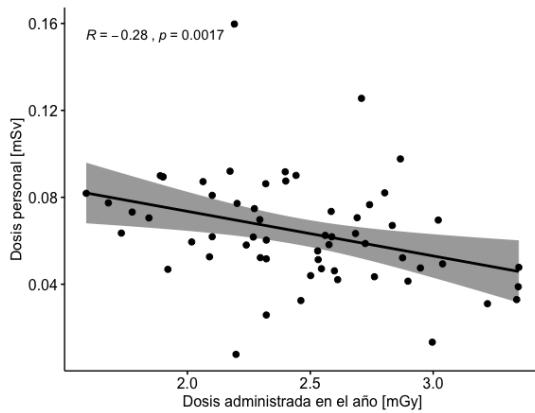
Con respecto a los resultados de la componente de estacionalidad de la serie de tiempo, se puede observar que definitivamente, el patrón cambió para la muestra. Para el médico A, el pico sigue



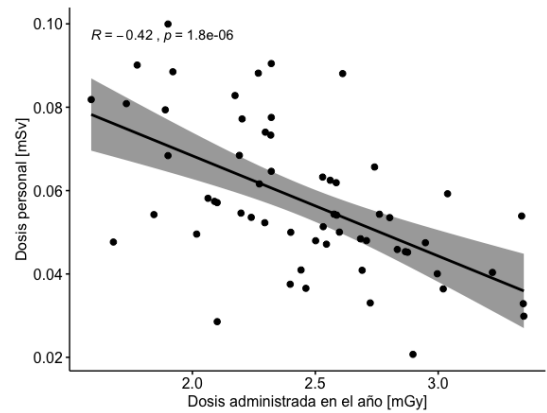
(a) Médico A



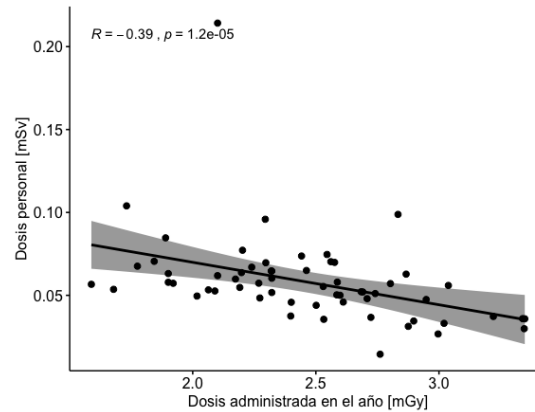
(b) Médico B



(c) Físico médico A



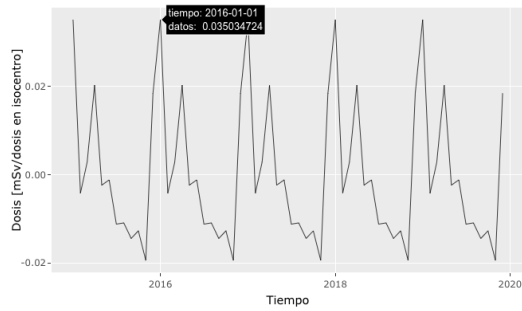
(d) Técnico A



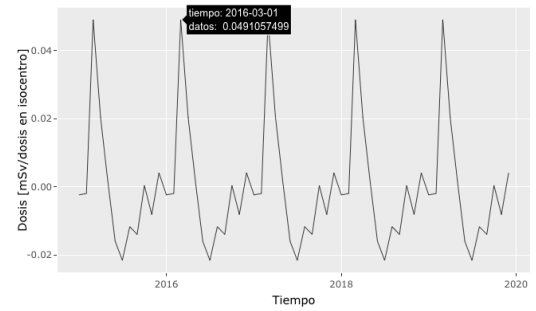
(e) Ingeniero A

Figura 9.10: Correlación de las variables normalizadas de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo para la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos.

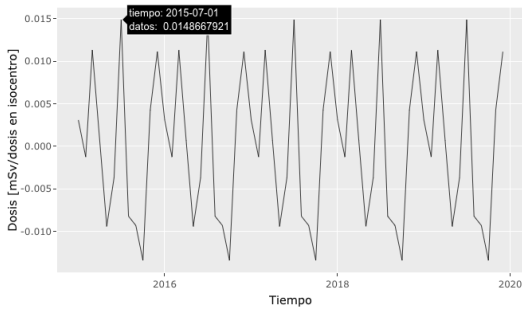
estando en el mes de enero, así como se observa en la Figura 9.11a. Para el médico B, en ambos casos el pico está en el mes de marzo. Según la Figura 9.11c para el físico médico A, su patrón cambió y se observa que para los datos normalizados, el pico se encuentra en septiembre. Sin los datos normalizados, este pico se encontraba en diciembre. Para el técnico A, con la normalización de



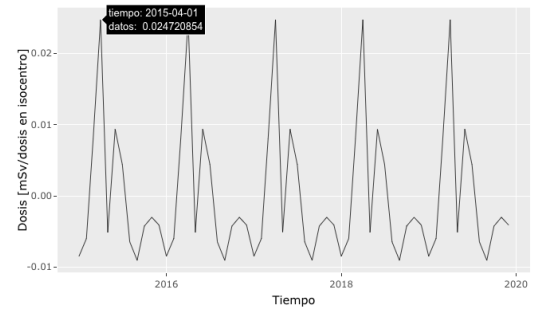
(a) Médico A



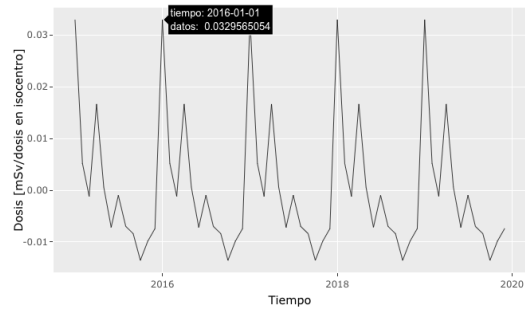
(b) Médico B



(c) Físico médico A



(d) Técnico A



(e) Ingeniero A

Figura 9.11: Componente de estacionalidad para la serie de tiempo de la dosis normalizada para la muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos.

los datos, el pico se encuentra en abril (Figura 9.11d), mientras que para el caso de no normalización, el pico se encuentra en enero. Por último, para el ingeniero A, el pico sí se mantuvo igual, siendo este en el mes de enero, así como se muestra en la Figura 9.11e. En general, solamente dos de los trabajadores cambiaron el mes con el que se recibió más dosis personal, mientras que el resto permaneció igual.

Discusión de resultados

El objetivo general de este trabajo fue realizar un análisis circular de los datos de dosimetría personal como método de evaluación de la protección radiológica de una muestra de los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la Clínica de Radioterapia La Asunción. Para los datos mensuales, se usaron dos métodos para evaluar la tendencia y direccionalidad de los datos. Específicamente para los datos mensuales, se obtuvo como resultado principal que existe un mes diferente con más dosis personal para cada trabajador de la muestra y con distinta magnitud. Para el médico A, técnico A e ingeniero A, el mes en el que se indica más tendencia es en enero, con una cantidad de 2.24 mSv, 2.06 mSv y 1.98 mSv, respectivamente. Para el físico médico A, se presentó que diciembre era el mes con más dosis personal, con valor de 2.30 mSv. Para el médico B se tiene que fue en marzo, con 2.13 mSv.

Para reforzar lo anterior, se usó un método lineal para comparar y verificar la tendencia de estos meses. Se usó una serie de tiempo y se verificaron los resultados por medio de una gráfica de la componente estacional. Se observó que la distribución de dosis personal varía para cada trabajador. El resultado común es que ninguno presenta una tendencia creciente, se mantiene constante en el tiempo; sin embargo, existe un mes a lo largo de los 10 años que cuenta con un dato atípico, siendo este el responsable de la preferencia de la direccionalidad, tanto como para el método circular como para el método lineal. Cuando se normalizaron los datos, la preferencia del mes cambió solamente para dos trabajadores, siendo este el caso para el físico médico A y para el técnico A. Para el primero, el pico se encontraba en diciembre y con la normalización, el pico cambió y se encontró en septiembre. Para el segundo, anteriormente la direccionalidad de los datos se encontraba en enero, y ya con el cambio, se encontró ahora en el mes de abril.

De los resultados anuales, se obtuvo como resultado principal que la suma de la dosis personal en los últimos cinco años cumple con el límite de dosis anual para un trabajador ocupacionalmente expuesto, según el Artículo 70 del Acuerdo Gubernativo Número 55-2001. Según el límite establecido, ningún trabajador expuesto a radiación debe sobrepasar una dosis efectiva promedio de 20 mSv por año, en un periodo de cinco años consecutivos. Es decir, la suma entre los cinco años no debe pasar de 100 mSv. De los resultados obtenidos, ningún trabajador sobrepasa de 10 mSv a lo largo del 2015 al 2019, cumpliendo con el requisito legal. Se observó que los datos oscilaron entre el intervalo de [8, 9.5] mSv. Para el médico A, el promedio entre los cinco años fue de 1.82 mSv; para el médico B, fue de 1.87 mSv; para el físico médico A, fue de 1.85 mSv; para el técnico A, fue de 1.64 mSv y para

el ingeniero A, fue de 1.66 mSv.

Para la correlación lineal entre la variable de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo, se usaron los datos no normalizados y los datos normalizados. Ambos datos no cumplieron con la prueba de una distribución normal, por lo que se usó la prueba de correlación de Kendall. Para los datos no normalizados, se obtuvo que los valores de p eran mayores al nivel de significancia $\alpha = 0.05$, por lo tanto no había suficiente información para rechazar la hipótesis nula, la cuál indicaba que no había correlación entre las variables. Luego de normalizar los datos, se obtuvo que toda la muestra contaba con un valor de p mucho menor a $\alpha = 0.05$ y de este modo, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que, para los datos normalizados, existe una correlación entre las variables. Con respecto al coeficiente de correlación, no se puede extraer mucha información de ello dado que se encuentran dentro del rango de $\tau \in [-0.2, -0.5]$; indicando que no hay una fuerte correlación negativa pero tampoco se puede decir que no hay ninguna asociación entre las variables.

Para los trabajadores ocupacionalmente expuestos en la Clínica de Radioterapia La Asunción:

1. Del análisis circular, se obtuvo que cada trabajador presentó un mes diferente con más dosis personal y con distinta magnitud, mostrando que la preferencia de la direccionalidad de los datos no era homogénea. En general, el promedio de dosis personal para cada mes se mantuvo en un intervalo de $[0.16, 0.18]$ mSv.
2. Se verificó esta direccionalidad usando una serie de tiempo, en donde se mostró el mismo resultado mencionado anteriormente. Sin embargo, al momento de normalizar los datos, solamente para dos trabajadores cambió esta direccionalidad.
3. La muestra de los trabajadores cumplen con la dosis permisible de un trabajador expuesto a radiación según el Artículo 70 del Acuerdo Gubernativo Número 55-2001, dado que la suma entre los cinco años no sobrepasó de 100 mSv para cada uno.
4. Para datos no normalizados, no se presentó una correlación entre a variable de dosis personal anual con la dosis administrada en ese tiempo, dado que para cada trabajador, el valor de p era menor al nivel de significancia de 5%, por lo que no había suficiente información para rechazar la hipótesis nula.
5. Para datos normalizados, sí existe una correlación entre las variables mencionadas anteriormente, ya que sí se logró rechazar la hipótesis nula. De este modo, las variables sí están correlacionadas. Con respecto al coeficiente de correlación, no se puede concluir algo en específico ya que el rango del coeficiente permanecía entre $[-0.2, -0.5]$, indicando que no hay una fuerte correlación negativa pero tampoco no hay ninguna asociación entre las variables.

CAPÍTULO 12

Recomendaciones

Para estudios futuros como continuación del análisis de datos presentados en este trabajo, se recomienda estudiar cómo se obtuvieron las mediciones de los dosímetros para identificar la razón de la tendencia para cada trabajador. Para ello, se podría investigar sobre el método de calibración del dosímetro correctamente asociado a cada mes, o bien, se puede investigar si cada trabajador mantuvo el mismo dosímetro a lo largo de sus años de labor. En caso contrario, identificar los meses en los que se cambió y comparar este resultado con la dosis personal que se recibió en ese tiempo.

Otro aporte para este análisis puede ser la correlación de los meses de vacación de cada trabajador con la dosis personal recibida. Con esto, se pretende identificar si los máximos y mínimos de cada trabajador coinciden con los meses de trabajo y vacaciones. Asimismo, se pretende identificar si por ejemplo, x trabajador toma vacaciones en abril y y trabajador no, entonces se intentaría buscar si el trabajador que no recibió vacaciones en ese mes recibió más dosis personal que el trabajador que sí tomó sus vacaciones; de este modo, se estarían complementando los resultados uno con el otro.

Bibliografía

- [1] Anomaly: *Extracting Seasonality and Trend from Data: Decomposition Using R*, 2015. <https://anomaly.io/seasonal-trend-decomposition-in-r/index.html>
- [2] Attix, Frank Herbert.: *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. VCH, 2007.
- [3] Connor, N.: *¿Qué es el dosímetro termoluminiscente? – TLD – Definición*, 2020. <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-dosimetro-termoluminiscente-tld-definicion/>
- [4] Consejo de Seguridad Nuclear: *Magnitudes y unidades radiológicas*, 2009. http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/624874014_241120091324.pdf
- [5] Consejo de Seguridad Nuclear: *Tema 5: Dosimetría de la radiación y dosimetría de la radiación externa*, 2013. http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1173720303_1572009113416.pdf
- [6] Esquivel, C. J.: *Control de Calidad Anual para Radioterapia de Intensidad Modulada Utilizando el End to End Test*. Tesis de Licenciatura, 2019. <https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2019-07/TESIS%2036.pdf>
- [7] Fuster, C., Floro M. Gómez J. Diaz A. Hitar J. & Marqueño P.: *Manual de Recomendaciones de Protección Frente a Radiaciones Ionizantes en el Servicio de Radiodiagnóstico*. Complejo Hospitalario Universitario de Albacete, The address of the publisher, 2018. <https://www.chospab.es/publicaciones/protocolosEnfermeria/documentos/20e3e6b07fa2c9acb5330d18ea692eac.pdf>
- [8] Gobierno de la República de Guatemala: *Decreto Ley Número 11-86: Ley para el control, uso y aplicación de radioisótopos y radiaciones ionizantes*, 1986. <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/1.3.5-Ley-Nuclear-Decreto-Ley-11-86.pdf>
- [9] Gobierno de la República de Guatemala: *Acuerdo Gubernativo Número 55-2001: Reglamento de Seguridad y Protección Radiológica de la Ley para el Control, Uso y Aplicación de Radioisótopos y Radiaciones Ionizantes*, 2001. http://cretec.org.gt/wp-content/files_mf/acuerdogubernativo552001.pdf
- [10] Hernández, E.: *Curso de Protección Radiológica*. [Presentación de Power Point], 2020.
- [11] Hernández, E.: *Uso de rayos X en la medicina*. [Presentación de Power Point], 2020.
- [12] Holmes, E. E., Scheurell M.D. & Ward E. J.: *Applied Time Series Analysis for Fisheries and Environmental Sciences*, 2020. <https://nwfsc-timeseries.github.io/atsa-labs/>

- [13] IAEA: *Radiation protection in the design of radiotherapy facilities*. International Atomic Energy Agency, 2006.
- [14] ICRP: *Protección Radiológica en Medicina*, 2011. <http://www.icrp.org/docs/P%20105%20Spanish.pdf>
- [15] Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU.: *Radioterapia para el cáncer*, 2019. <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/tratamiento/tipos/radioterapia>
- [16] Johns, H. E., & Cunningham J. R.: *The Physics of Radiology*. Thomas Books, 1983.
- [17] López, J. M.: *Riesgos de la excesiva exposición solar*, 2016. <https://sites.google.com/a/info-farmacia.com/info-farmacia/medico-farmaceuticos/informes-tecnicos/riesgos-de-la-excesiva-exposici?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>
- [18] Magiya, J.: *Kendall Rank Correlation Explained*, 2019. <https://towardsdatascience.com/kendall-rank-correlation-explained-dee01d99c535>
- [19] Morrison, William: *X-ray exposure: How safe are X-rays?*, 2018. <https://www.medicalnewstoday.com/articles/219970>
- [20] OIEA: *Evaluación de la exposición ocupacional debida a fuentes externas de radiación*, 2004. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1076s_web.pdf
- [21] Pewsey, A., Neuhauser M. & Ruxton G. D.: *Circular statistics in R*. Oxford University Press, 2013.
- [22] Podgorsak, E. B.: *Radiation Physics for Medical Physicists*. Springer, 2018.
- [23] Purdy, J.A., Poortmans P. Perez C.A. & Levitt S.H.: *Physics of Radiotherapy Planning and Delivery*. Springer, 2011.
- [24] Pérez, P.: *Acelerador Lineal (LINAC) de Uso Clínico*, 2018. <https://www.famaf.unc.edu.ar/~pperez1/manuales/cdr/Linac.html>
- [25] Reed, A. M.: *The history of radiation use in medicine*. Journal of Vascular Surgery, 53(1):3S–5S, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2010.07.024>
- [26] Rivera, F. & Vargas, A.: *Programa de Vigilancia Radiológicas Individual*. Tesis de Doctorado, 2020.
- [27] Serway, R. A., Moses C. J. & Moyer C. A.: *Modern Physics*. Thomson Learning, 2005.
- [28] Shigematsu, N., Fukada J. Ohashi T. Kawaguchi O. & Kawata T.: *Nuclear Disaster after the Earthquake and Tsunami of March 11*. The Keio journal of medicine, 61:28–34, Marzo 2012.
- [29] STHDA: *Correlation Test Between Two Variables in R*, 2020. <http://www.sthda.com/english/wiki/correlation-test-between-two-variables-in-r>

Efecto Compton

El experimento liderado por Arthur Holly Compton en 1922, confirmó que los rayos X se comportan como partículas. Uno de los resultados más importantes de este experimento es que los cambios en la longitud de onda de los rayos X dispersados son completamente independientes de la intensidad de radiación y de su longitud de exposición, mostrando que solamente depende de su ángulo de dispersión. En el modelo cuántico, la transferencia de momentum y energía se realiza entre un fotón de rayos X y un electrón, tal como se muestra en la Figura A.1

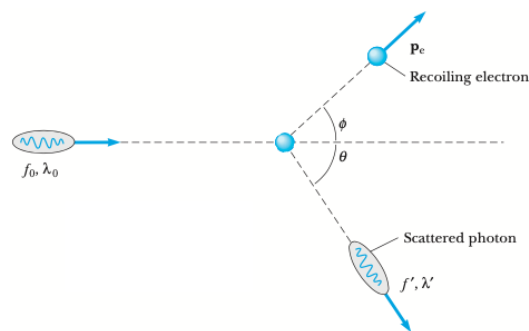


Figura A.1: Modelo cuántico de la dispersión de los rayos X del efecto Compton [27]

La longitud de onda se midió usando un espectrómetro de cristal rotatorio, y la intensidad fue determinada por una cámara de ionización que generó una corriente proporcional a la intensidad de los rayos X. La relación entre la intensidad y la longitud de onda, fue observada por Compton para los ángulos 0° , 45° , 90° y 135° [27]. Se mostraron dos picos: uno en λ_0 y otro en otra longitud de onda más grande, λ' . Asumiendo que los rayos X se comportan como partículas, el cambio λ' solamente depende de su ángulo de dispersión, mostrando que

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (\text{A.1})$$

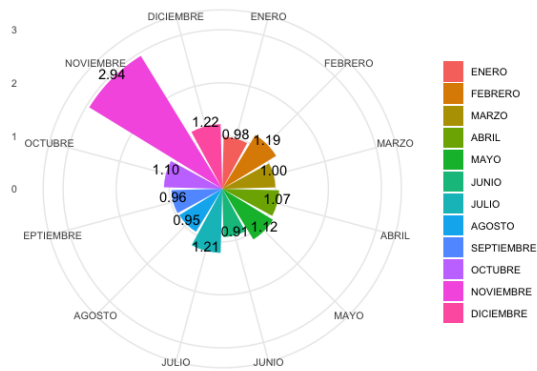
Resultados del resto de trabajadores

A continuación se presentan los resultados del resto de trabajadores que no fueron parte de la muestra seleccionada.

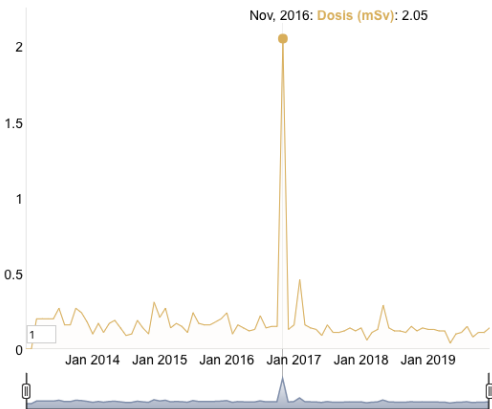
Tabla B.1: Resultados de la prueba de correlación de Kendall con datos normalizados

<i>Trabajador</i>	<i>Mes con más dosis</i>	<i>Cantidad de dosis [mSv]</i>	<i>¿Hay correlación? (no normalización)</i>	<i>¿Hay correlación? (normalización)</i>
<i>Médicos</i>				
M32MC	Noviembre	2.94	No	Sí
M38EP	Marzo	0.58	No	Sí
<i>Físico médico</i>				
F10LD	Mayo	2.23	No	Sí
F27RC	Mayo	1.74	No	Sí
<i>Técnico</i>				
T19SR	Marzo	2.15	No	Sí
T26PM	Diciembre	2.22	No	Sí
T35EE	Enero	2.34	Sí	No
T36ML	Diciembre	0.90	No	Sí

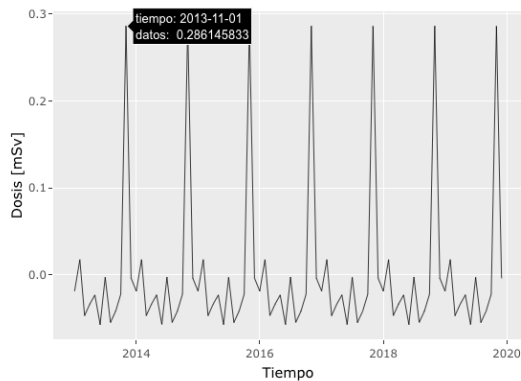
En la siguiente página se muestran los resultados gráficos de cada trabajador que resumen la tabla anterior.



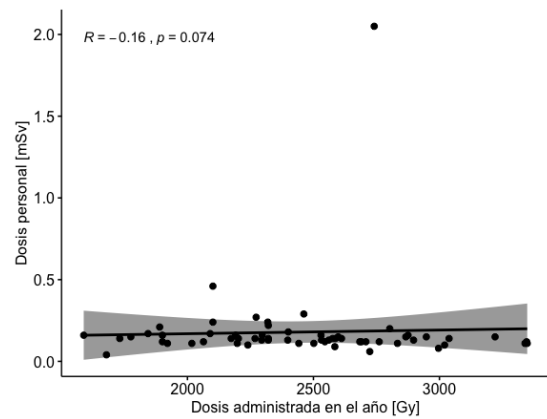
(a) Gráfica circular



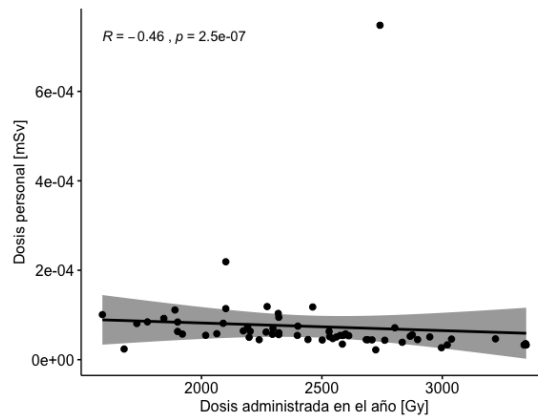
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad

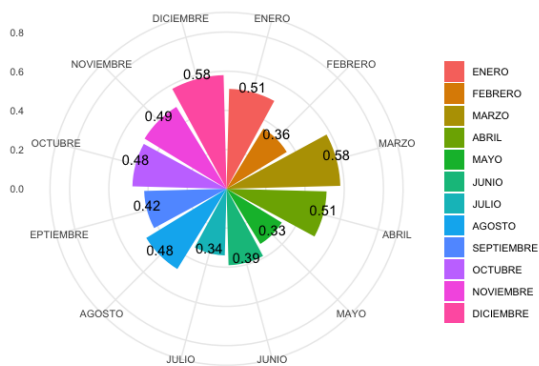


(d) Correlación con datos no normalizados

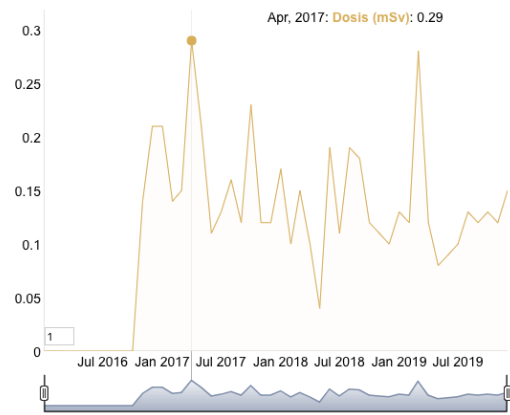


(e) Correlación con datos normalizados

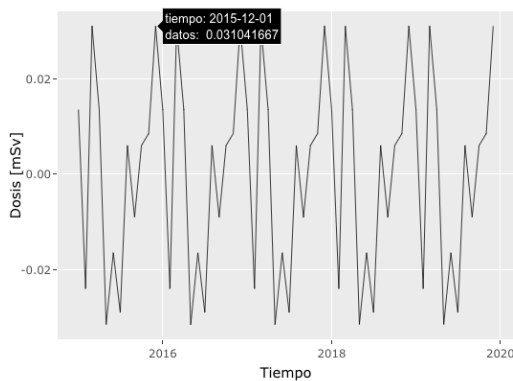
Figura B.1: Resultados para el trabajador M32MC. Se muestran los resultados a partir del 2013 hasta el 2019.



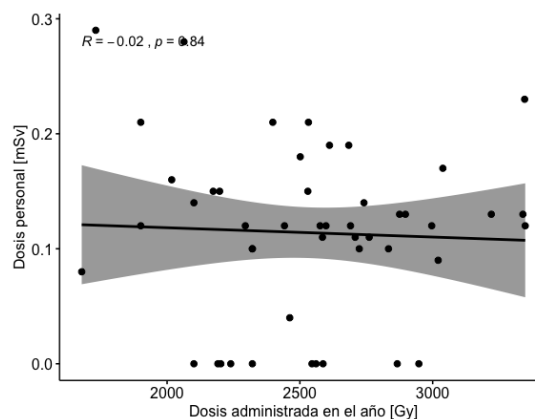
(a) Gráfica circular



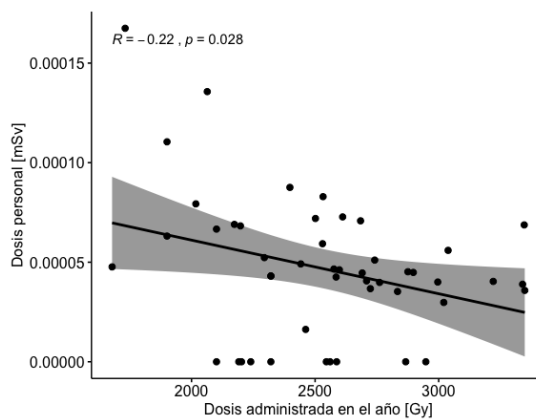
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad

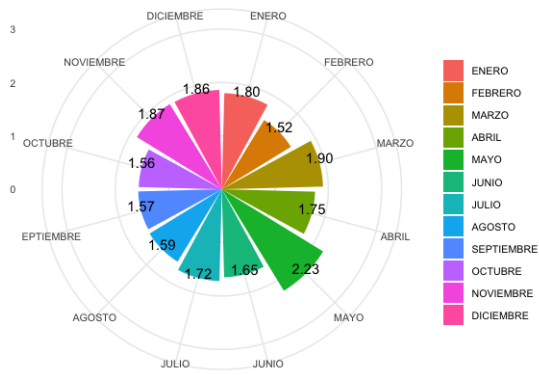


(d) Correlación con datos no normalizados

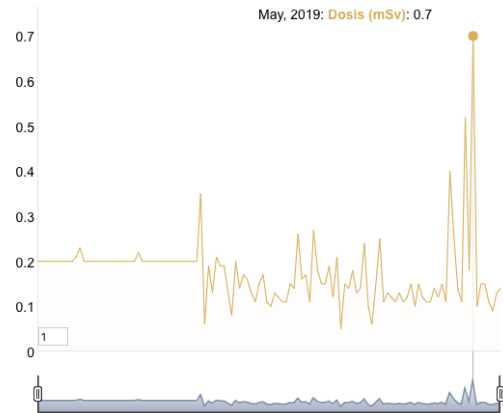


(e) Correlación con datos normalizados

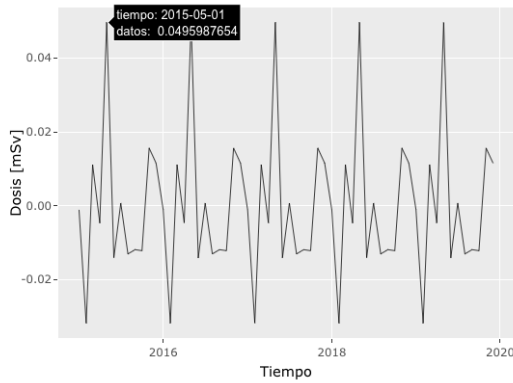
Figura B.2: Resultados para el trabajador M38EP. Se muestran los resultados a partir del 2016 hasta el 2019.



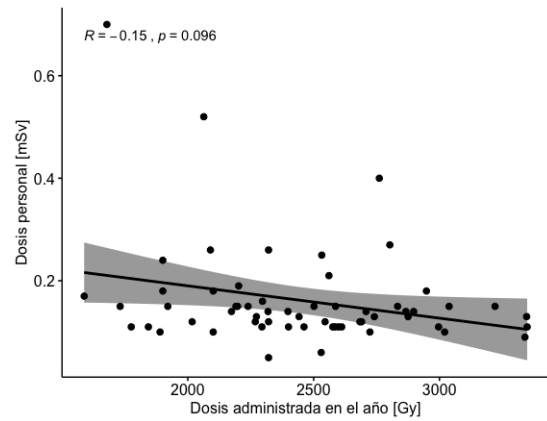
(a) Gráfica circular



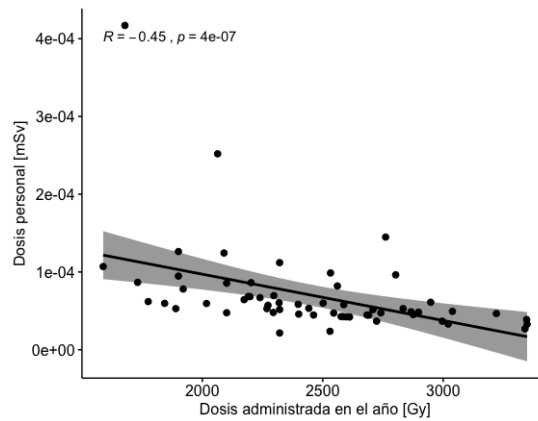
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad

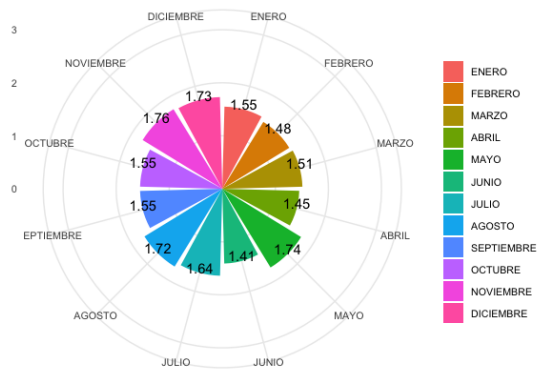


(d) Correlación con datos no normalizados

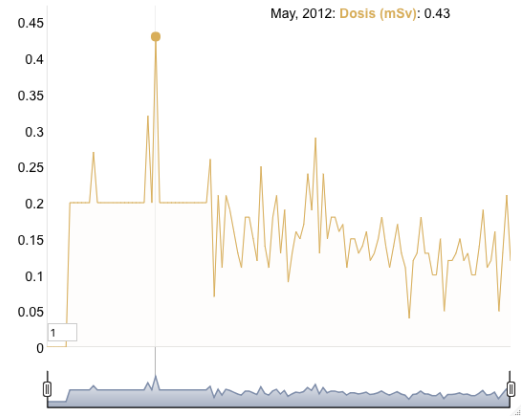


(e) Correlación con datos normalizados

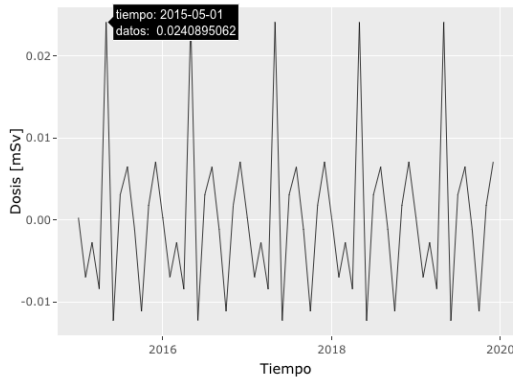
Figura B.3: Resultados para el trabajador F10LD. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.



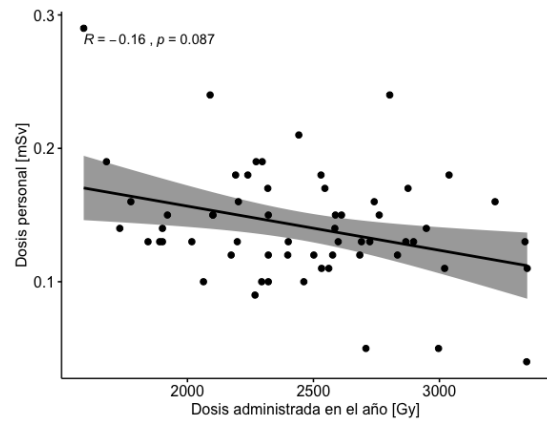
(a) Gráfica circular



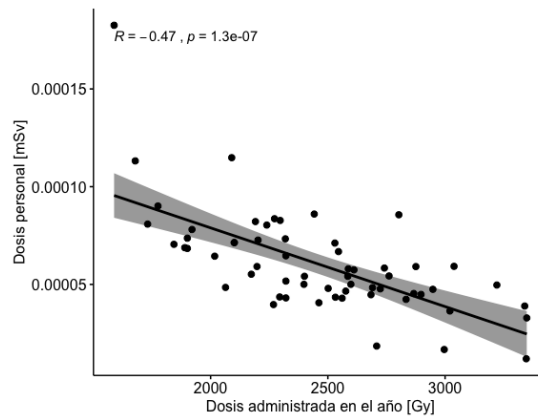
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad

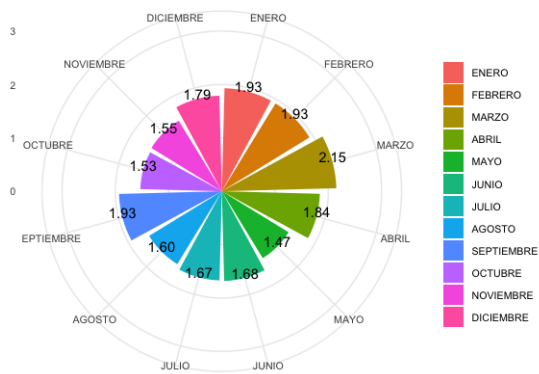


(d) Correlación con datos no normalizados

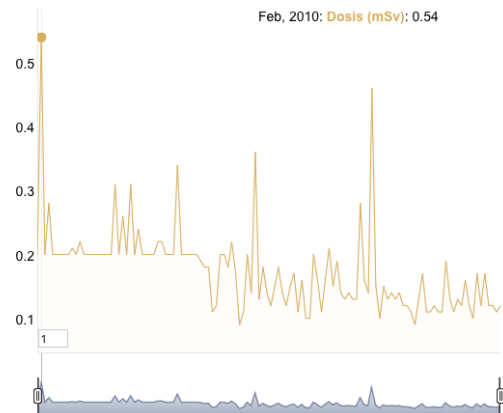


(e) Correlación con datos normalizados

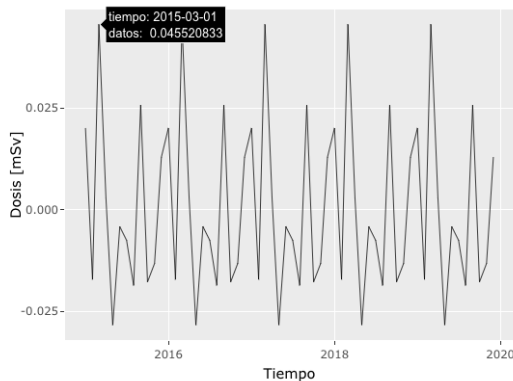
Figura B.4: Resultados para el trabajador F27RC. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.



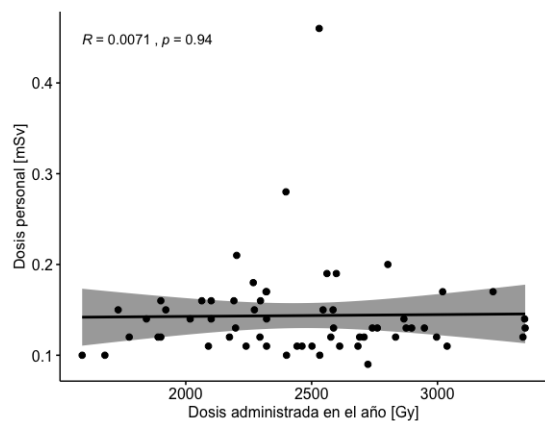
(a) Gráfica circular



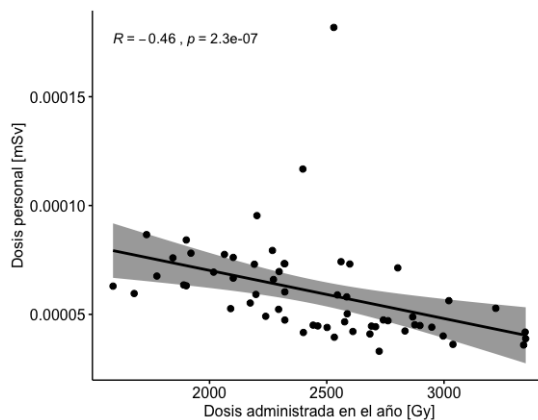
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad

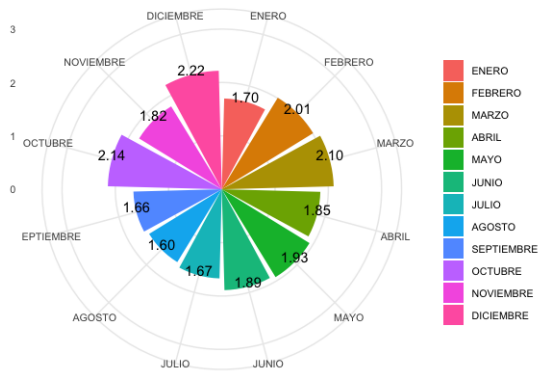


(d) Correlación con datos no normalizados

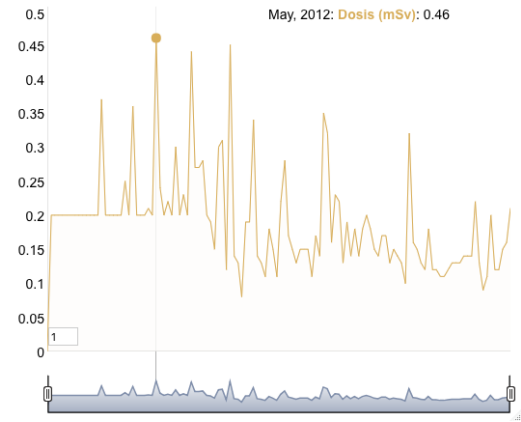


(e) Correlación con datos normalizados

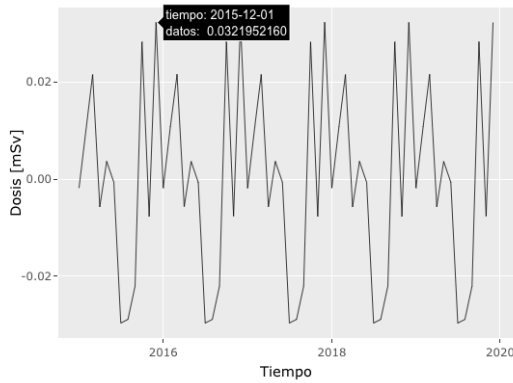
Figura B.5: Resultados para el trabajador T19SR. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.



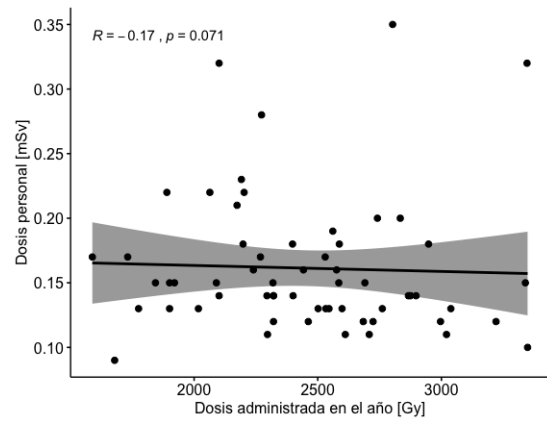
(a) Gráfica circular



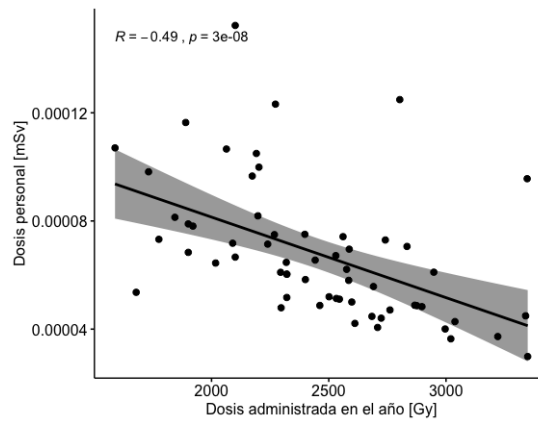
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad

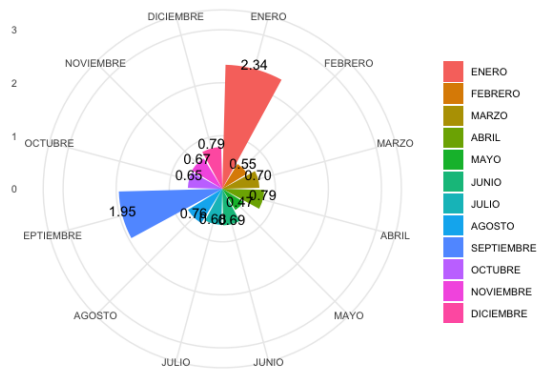


(d) Correlación con datos no normalizados

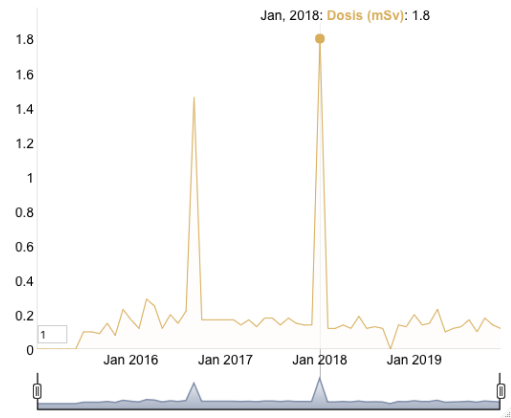


(e) Correlación con datos normalizados

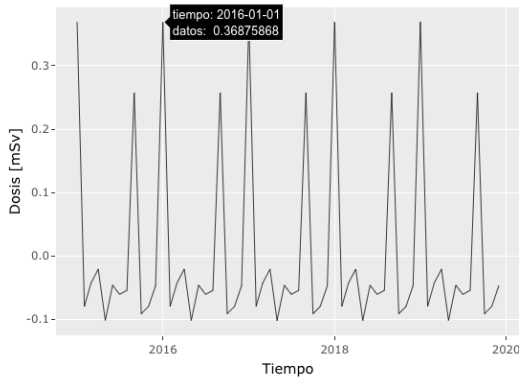
Figura B.6: Resultados para el trabajador T26PM. Se muestran los resultados a partir del 2010 hasta el 2019.



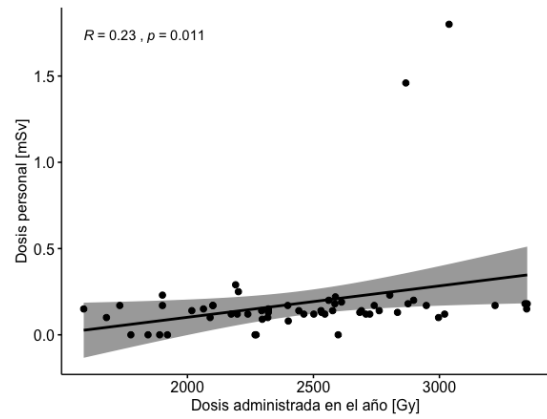
(a) Gráfica circular



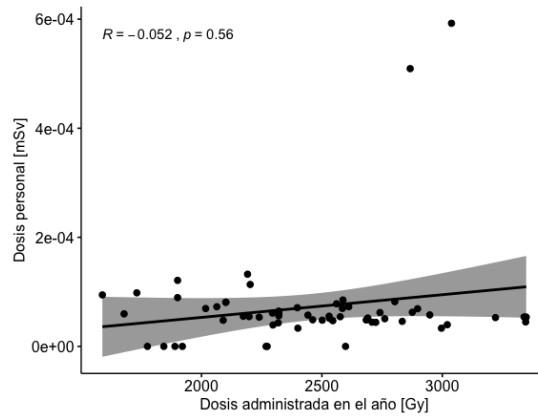
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad

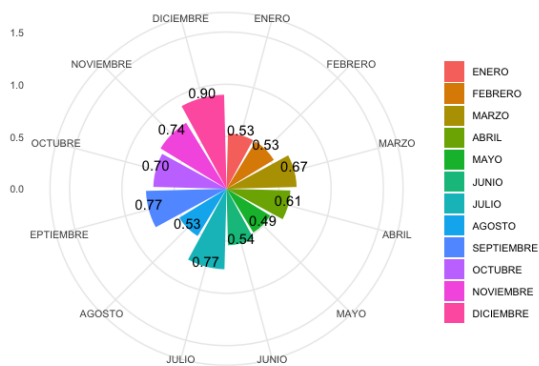


(d) Correlación con datos no normalizados

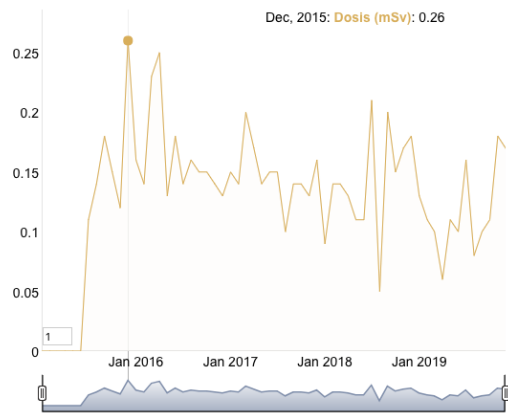


(e) Correlación con datos normalizados

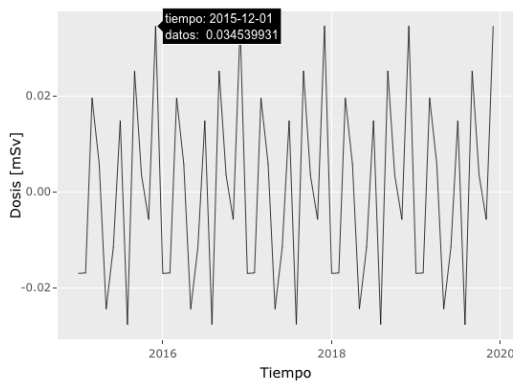
Figura B.7: Resultados para el trabajador T35EE. Se muestran los resultados a partir del 2015 hasta el 2019.



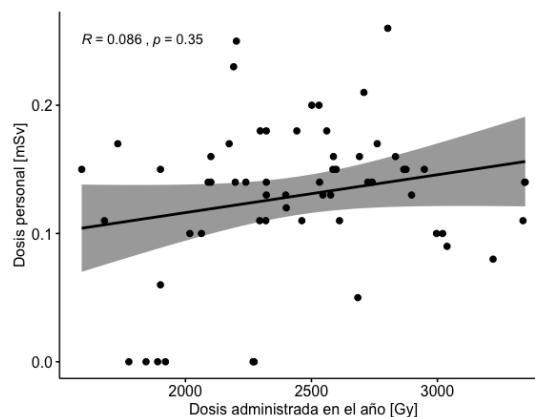
(a) Gráfica circular



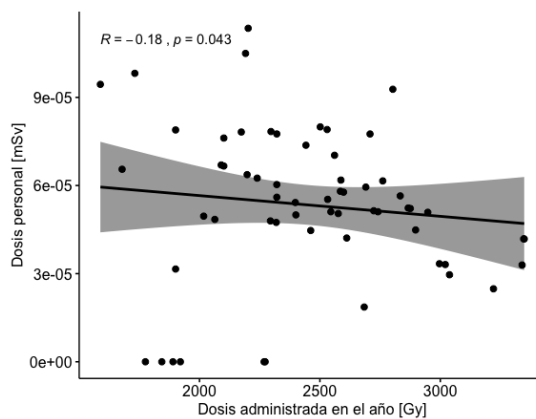
(b) Serie de tiempo completa



(c) Componente de estacionalidad



(d) Correlación con datos no normalizados



(e) Correlación con datos normalizados

Figura B.8: Resultados para el trabajador T36ML. Se muestran los resultados a partir del 2015 hasta el 2019.

Programa creado para el análisis de datos

A continuación se presenta el código creado para la realización de todos los resultados presentados anteriormente. Se usó RStudio para la elaboración de todo.

```
#####  
## Universidad del Valle de Guatemala      ##  
## Tema:                                  ##  
##     Analisis de datos circulares de DP  ##  
## Autora:                                ##  
##     Elvia Odalis Reyes Guevara         ##  
## Fecha:                                  ##  
##     Octubre 2020                        ##  
#####  
  
#-----  
# Instalacion de paquetes nuevos en caso no esten descargados  
#-----  
if(!require(readxl)) {install.packages("readxl")}  
if(!require(circular)) {install.packages("circular")}  
if(!require(tidyverse)) {install.packages("tidyverse")}  
if(!require(dplyr)) {install.packages("dplyr")}  
if(!require(ggplot2)) {install.packages("ggplot2")}  
if(!require(tseries)) {install.packages("tseries")}  
if(!require(dygraphs)) {install.packages("dygraphs")}  
  
#-----  
# Se importan las librerias  
#-----  
library("readxl") # para leer archivos excel  
library("circular") # para hacer estadstica circular  
library('tidyverse')  
library("dplyr")  
library('ggplot2') # para hacer grficas bonitas
```

```

library('tseries') # series de tiempo
library('dygraphs') # grafica interactiva ts
library('xts') # formato xts
library('plotly') # grafica interactiva
library("ggpubr") # easy ggplot2-based data visualization

#-----
# Carga de archivos
#-----

# Directorio en donde se encuentran los datos
setwd("/Users/odalisrg/Downloads/DPDatos/Anual")

# Se cargan los archivos del 2010-2019 y se leen los datos
DP2010 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2010.xls", sheet = 1, range = cell_rows(10:26),
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2011 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2011.xls", sheet = 1, range = cell_rows(10:26),
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2012 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2012.xlsx", sheet = 1, range = cell_rows(7:25),
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2013 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2013.xlsx", sheet = 1, range = 'A6:P23',
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2014 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2014.xlsx", sheet = 1, range = 'A6:P23',
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2015 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2015.xls", sheet = 1, range = 'A4:P22',
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2016 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2016.xls", sheet = 1, range = 'A4:P24',
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2017 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2017.xls", sheet = 1, range = 'A4:P25',
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2018 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2018.xlsx", sheet = 1, range = 'A4:P26',
  col_names = TRUE, col_types = 'list')
DP2019 <- read_excel("Reporte dosimetrico 2019.xlsx", sheet = 1, range = 'A5:P27',
  col_names = TRUE, col_types = 'list')

#-----
# Funciones para modificar el DF
#-----

# Proposito: Escoger los datos de un solo trabajador
# @param: num1, num2 (ltimos dos dgitos del codigo del trabajador)
Trabajador <- function(num1,num2){
  # se establece el codigo del trabajador para sacar los datos
  codigo = paste0('238-',num1,num2)
  # se sacan esos datos, se coloca transpuesta y se convierte a un dataframe
  a <- as.data.frame(t(DP2010[which(DP2010$CODIGO==codigo),]))
  b <- as.data.frame(t(DP2011[which(DP2011$CODIGO==codigo),]))
  c <- as.data.frame(t(DP2012[which(DP2012$CODIGO==codigo),]))
  d <- as.data.frame(t(DP2013[which(DP2013$CODIGO==codigo),]))
  e <- as.data.frame(t(DP2014[which(DP2014$CODIGO==codigo),]))
  f <- as.data.frame(t(DP2015[which(DP2015$CODIGO==codigo),]))
  g <- as.data.frame(t(DP2016[which(DP2016$CODIGO==codigo),]))
  h <- as.data.frame(t(DP2017[which(DP2017$CODIGO==codigo),]))
  i <- as.data.frame(t(DP2018[which(DP2018$CODIGO==codigo),]))
  j <- as.data.frame(t(DP2019[which(DP2019$CODIGO==codigo),]))
  # se combinan los datos por columnas
  newdf <- cbind(a,b,c,d,e,f,g,h,i,j)
  newdf <- as.data.frame(newdf)
}

```

```

# Proposito: Cambiar el nombre de las columnas por el año que corresponde
# @param: x (dataframe)
NombreColumnas <- function(x){
  # se eliminan las primeras 3 filas (cdigo, nombre, apellido)
  x <- x[c(4:16),]
  # se elimina la fila del total de excel
  x <- x[-c(13), ]
  for (i in 1:length(x)){
    # se agrega el año como nombre de la columna
    names(x)[i] <- paste0('201',abs(10-i))
  }
  # convierte el nombre de las columnas a variables numéricas
  cnames <- sapply(colnames(x), as.numeric)
  # reordena el orden de las columnas de menor a mayor
  colnames(x) <- sort(cnames)
  return(x)
}

# Proposito: Limpiar los datos
# @param: x (dataframe)
Limpieza <- function(x){
  x[x == "*"] <- 0
  x[x == "---"] <- 0
  x[x == "***"] <- 0
  x[x == "NEC"] <- 0
  x[x == "M"] <- 0.2
  return(x)
}

# Proposito: Obtener los totales de los datos fila y datos columna
# @param: x (dataframe)
TotalFilaColumna <- function(x){
  x['TOTAL',] <- colSums(sapply(x, as.numeric)) # suma de columnas
  x$MesTotal <- rowSums(sapply(x, as.numeric)) # suma de filas
  return(x)
}

# Proposito: Convertir los meses en una columna de tipo factor
# @param: x (dataframe)
FilasFactor <- function(x){
  # se agrega una columna con los mismos nombres del índice
  x <- cbind(Mes = rownames(x), x)
  rownames(x) <- NULL # se elimina el índice con los meses
  x$Mes <- factor(x$Mes, levels=unique(x$Mes)) # se crea una columna aparte de los meses
  return(x)
}

# Proposito: Calcular la estadística circular mensual
# @param: x (dataframe)
CircularMensual <- function(x, inicio, fin){
  # se extraen todos los datos mensuales
  todo <- data.frame(a=unlist(x[1:12, inicio:fin], use.names = FALSE))
  # se convierten los datos a datos circulares
  cx <- circular(todo, type='angles', units='degrees', template='none', modulo='asis',
    zero=0, rotation='counter')
  cx <- as.numeric(cx)
  cx <- circular(cx)
}

```

```

# Estadística Circular
media <- mean(cx)
longresult <- rho.circular(cx)
varianza <- (1-rho.circular(cx))
desv <- sd.circular(cx)

# se imprimen los resultados
print(paste0('- La media circular es: ', round(media,3)))
print(paste0('- La longitud del vector medio es: ', round(longresult,3)))
print(paste0('- La varianza circular es: ', round(varianza,3)))
print(paste0('- La desviación estandar circular es: ', round(desv,3)))
}

# Propósito: Calcular la estadística circular anual de los últimos 5 años
# @param: x (dataframe)
CircularAnual <- function(x, inicio, fin){
  # se convierten los datos a datos circulares
  cx <- circular(x[13, inicio:fin], type='angles', units='degrees', template='none',
    modulo='asis', zero=0, rotation='counter')
  cx <- as.numeric(cx)
  cx <- circular(cx)

  # Estadística Circular
  suma <- sum(cx)
  media <- mean(cx)
  longresult <- rho.circular(cx)
  varianza <- (1-rho.circular(cx))
  desv <- sd.circular(cx)

  # se imprimen los resultados
  print(paste0('- La dosis acumulada en los últimos años es de: ', round(suma,2)))
  print(paste0('- La media circular es: ', round(media,2)))
  print(paste0('- La longitud del vector medio es: ', round(longresult,2)))
  print(paste0('- La varianza circular es: ', round(varianza,2)))
  print(paste0('- La desviación estandar circular es: ', round(desv,2)))
}

# Propósito: Realiza una gráfica de barras circular del total de meses
# @param: x (dataframe)
cbarras.plot <- function(df){
  cplot <- ggplot(df[1:12,], aes(x=df$Mes[1:12], y=df$MesTotal[1:12], fill =
    df$Mes[1:12])) +
  geom_bar(stat="identity") +
  ylim(0,3) + # normalizados: 0.00060, no normalizados: 3
  theme_minimal() +
  theme(
    axis.title = element_blank(),
    axis.text=element_text(size=8),
    legend.title = element_blank(),
    legend.text= element_text(size=8),
    plot.caption = element_text(hjust = 0)
  ) +
  coord_polar(start = 0)+
  geom_text(aes(label=format(df$MesTotal[1:12], digits=3)),
    position=position_dodge(width=0.5), vjust=0)
  return(cplot)
}

# Propósito: Graficar una serie de tiempo interactiva

```

```

# @param: x (dataframe)
ts.interactive <- function(x, inicio, fin){
  # descompone el dataframe y lo une todo como un solo vector
  df <- data.frame(datos=unlist(x[1:12, inicio:fin]), use.names = FALSE)
  # agrega la variable del tiempo, desde 01-2010 hasta 12-2019
  df$tiempo = seq(as.Date("2010/1/1"), as.Date("2019/12/31"), "month")
  # conversin de data frame -> formato xts
  don <- xts(x = df$datos, order.by = df$tiempo)

  # grafica la serie de tiempo interactiva
  p <- dygraph(don) %>%
  dySeries("V1", label = "Dosis (mSv)") %>%
  dyLegend(show = "always", hideOnMouseOut = FALSE) %>%
  dyOptions(labelsUTC = TRUE, fillGraph=TRUE, fillAlpha=0.1, drawGrid = FALSE,
    colors="#D8AE5A") %>%
  dyRangeSelector() %>%
  dyCrosshair(direction = "vertical") %>%
  dyHighlight(highlightCircleSize = 5, highlightSeriesBackgroundAlpha = 0.2,
    hideOnMouseOut = FALSE) %>%
  dyRoller(rollPeriod = 1)
  return(p)
}

# Proposito: Graficar la parte seasonal de la serie de timepo
# @param: x (dataframe)
ts.season <- function(x, inicio, fin){
  # descompone el dataframe y lo une todo como un solo vector
  df <- data.frame(datos=unlist(x[1:12, inicio:fin]), use.names = FALSE)
  # convierte los datos a una serie de tiempo
  df.ts <- ts(df, start = c(2010,1), end=c(2019,12), frequency = 12)
  # descompone la serie de tiempo
  df.ts.desc <- decompose(df.ts)
  vec <- data.frame(datos=sapply(df.ts.desc$seasonal, as.numeric))
  vec$tiempo = seq(as.Date("2015/1/1"), as.Date("2019/12/31"), "month")
  # se grafica solamente la parte seasonal
  season.df <- ggplot(data = vec, aes(x = tiempo, y = datos))+ geom_line(size = 0.2)+
  xlab('Tiempo') + ylab('Dosis [mSv/dosis en isocentro]')
  season.df <- ggplotly(season.df)
  return(season.df)
}

# Proposito: Correlacionar los datos
# @param: x (dataframe)
corr.pacientes <- function(x, inicio, fin){
  # se incluyen los datos de los pacientes de 2015-2019
  p2015 <- c(859,1033,1031,838,807,873,1054,950,1044,722,1091,1274)
  p2016 <- c(955,1018,996,1001,1157,1164,1055,1176,1303,1340,1246,1090)
  p2017 <- c(864,955,1150,787,1151,1175,1307,917,1522,1521,1171,1223)
  p2018 <- c(1381,1238,999,1055,1119,1187,1231,1220,1137,1181,1255,1055)
  p2019 <- c(1317,1043,938,864,763,1373,1288,1464,1362,1518,1110,988)
  pacientes <- c(p2015,p2016,p2017,p2018,p2019)*(2.20) # dosis promedio en c/sesin [Gy]
  # se incluyen los datos del trabajador
  trabajador <- data.frame(datos=unlist(x[1:12, inicio:fin]), use.names = FALSE)
  trab.p <- data.frame(datos=trabajador, pacientes=pacientes)

  # regresion lineal
  regresion.plot <- ggscatter(trab.p, x = 'pacientes', y = 'datos',
    add = "reg.line", conf.int = TRUE,
    cor.coef = TRUE, cor.method = "kendall",

```

```

        xlab = "Dosis administrada en el ao [Gy]", ylab = "Dosis
            personal [mSv]")

# uniformidad de los datos y test de normalidad
uniform.x <- ggqqplot(trab.p$pacientes, xlab = 'Datos tericos', ylab = "Dosis
    administrada en el ao [Gy]")
uniform.y <- ggqqplot(trab.p$datos, xlab = 'Datos tericos', ylab = "Dosis acumulada
    [mSv]")
shapiro.test(trab.p$datos) # si
shapiro.test(trab.p$pacientes)

# resultados
print(cor.test(trab.p$pacientes, trab.p$datos, method="kendall")) # prueba de correlacin
#print(shapiro.test(trab.p$datos))
return(regresion.plot)
}

# Proposito: Normaliza los datos de cada trabajador con respecto a la dosis que el
    acelerador administr en cada mes
# @param: x (dataframe)
normalizar <- function(x, inicio, fin){
    # se incluyen los datos de los pacientes de 2015-2019
    p2015 <- c(859,1033,1031,838,807,873,1054,950,1044,722,1091,1274)
    p2016 <- c(955,1018,996,1001,1157,1164,1055,1176,1303,1340,1246,1090)
    p2017 <- c(864,955,1150,787,1151,1175,1307,917,1522,1521,1171,1223)
    p2018 <- c(1381,1238,999,1055,1119,1187,1231,1220,1137,1181,1255,1055)
    p2019 <- c(1317,1043,938,864,763,1373,1288,1464,1362,1518,1110,988)
    pacientes <- c(p2015,p2016,p2017,p2018,p2019)*(2.20) # dosis promedio en c/sesin [Gy]

    # se escogen los datos de 2015-2019
    meses =
        c('ENERO', 'FEBRERO', 'MARZO', 'ABRIL', 'MAYO', 'JUNIO', 'JULIO', 'AGOSTO', 'SEPTIEMBRE', \
        'OCTUBRE', 'NOVIEMBRE', 'DICIEMBRE', 'TOTAL')
    new.x <- sapply(x[1:12, inicio:fin], as.numeric)

    # se normaliza
    norm.x <- cbind(new.x/pacientes)
    norm.x <- as.data.frame(norm.x)

    # se calcula la suma de cada mes y de todos los anios
    norm.x$MesTotal <- rowSums(sapply(norm.x, as.numeric)) # filas
    atotal <- colSums(sapply(norm.x, as.numeric)) # columnas
    norm.x <- rbind(norm.x, atotal)

    # se combina todo en un dataframe
    norm.x <- cbind(Mes=meses, norm.x)
    norm.x <- as.data.frame(norm.x)
    norm.x$Mes <- factor(meses, levels=unique(meses))
    return(norm.x)
}

#-----
# Aplicacion de las funciones
#-----

#-----
# MEDICOS = 2

```

```
# Trabajador M03LU
M03LU <- Trabajador(0,3)
M03LU <- NombreColumnas(M03LU)
M03LU <- Limpieza(M03LU)
M03LU <- TotalFilaColumna(M03LU)
M03LU <- FilasFactor(M03LU)
```

```
# Trabajador M05MO
M05MO <- Trabajador(0,5)
M05MO <- NombreColumnas(M05MO)
M05MO <- Limpieza(M05MO)
M05MO <- TotalFilaColumna(M05MO)
M05MO <- FilasFactor(M05MO)
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# FISICOS MEDICOS = 2
```

```
# Trabajador F04EH
F04EH <- Trabajador(0,4)
F04EH <- NombreColumnas(F04EH)
F04EH <- Limpieza(F04EH)
F04EH <- TotalFilaColumna(F04EH)
F04EH <- FilasFactor(F04EH)
```

```
# Trabajador F10LD
F10LD <- Trabajador(1,0)
F10LD <- NombreColumnas(F10LD)
F10LD <- Limpieza(F10LD)
F10LD <- TotalFilaColumna(F10LD)
F10LD <- FilasFactor(F10LD)
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# TECNICOS = 2
```

```
# Trabajador T01EE
T01EE <- Trabajador(0,1)
T01EE <- NombreColumnas(T01EE)
T01EE <- Limpieza(T01EE)
T01EE <- TotalFilaColumna(T01EE)
T01EE <- FilasFactor(T01EE)
```

```
# Trabajador T26PM
T26PM <- Trabajador(2,6)
T26PM <- NombreColumnas(T26PM)
T26PM <- Limpieza(T26PM)
T26PM <- TotalFilaColumna(T26PM)
T26PM <- FilasFactor(T26PM)
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# INGENIEROS = 1
```

```
# Trabajador I22CR
I22CR <- Trabajador(2,2)
I22CR <- NombreColumnas(I22CR)
I22CR <- Limpieza(I22CR)
I22CR <- TotalFilaColumna(I22CR)
```

```
I22CR <- FilasFactor(I22CR)
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# Analisis exploratorio
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# MEDICOS
```

```
# Trabajador M03LU
```

```
cbarras.plot(M03LU)
```

```
ts.interactive(M03LU,2,11)
```

```
ts.season(M03LU,2,11)
```

```
# Trabajador M05MO
```

```
cbarras.plot(M05MO)
```

```
ts.interactive(M05MO,2,11)
```

```
ts.season(M05MO,2,11)
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# FISICOS MEDICOS
```

```
# Trabajador F04EH
```

```
cbarras.plot(F04EH)
```

```
ts.interactive(F04EH,2,11)
```

```
ts.season(F04EH,2,11)
```

```
# Trabajador F10LD
```

```
cbarras.plot(F10LD)
```

```
ts.interactive(F10LD,2,11)
```

```
ts.season(F10LD,2,11)
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# TECNICOS
```

```
# Trabajador T01EE
```

```
cbarras.plot(T01EE)
```

```
ts.interactive(T01EE,2,11)
```

```
ts.season(T01EE,2,11)
```

```
# Trabajador T26PM
```

```
cbarras.plot(T26PM)
```

```
ts.interactive(T26PM,2,11)
```

```
ts.season(T26PM,2,11)
```

```
#-----
```

```
#-----
```

```
# INGENIERO
```

```
# Trabajador I22CR
```

```
cbarras.plot(I22CR)
```

```
ts.interactive(I22CR,2,11)
```

```
ts.season(I22CR,2,11)
```

```
#-----
```

```

#-----
# Estadística circular
#-----

#-----
# MEDICOS

# Trabajador M03LU
CircularMensual(M03LU,2,11) # 2010-2019
CircularAnual(M03LU,7,11) # 2015-2019

# Trabajador M05MO
CircularMensual(M05MO,2,11)
CircularAnual(M05MO,7,11)
#-----

#-----
# FISICOS MEDICOS

# Trabajador F04EH
CircularMensual(F04EH,2,11)
CircularAnual(F04EH,7,11)

# Trabajador F10LD
CircularMensual(F10LD,2,11)
CircularAnual(F10LD,7,11)
#-----

#-----
# TECNICOS

# Trabajador T01EE
CircularMensual(T01EE,2,11)
CircularAnual(T01EE,7,11)

# Trabajador T26PM
CircularMensual(T26PM,2,11)
CircularAnual(T26PM,7,11)
#-----

#-----
# INGENIERO

# Trabajador I22CR
CircularMensual(I22CR,2,11) # media =1.61, R=0.98, V=0.02, Desv=0.2
# nueva funcion = 0.16, 1, 0, 0.06
CircularAnual(I22CR,7,11)
#-----

#-----
# Correlacion de datos
#-----

#-----
corr.pacientes(M03LU,7,11) # 2015-2019

```

```

corr.pacientes(M05M0,7,11)

corr.pacientes(F04EH,7,11)

corr.pacientes(T01EE,7,11)

corr.pacientes(I22CR,7,11)
#-----

#-----
# Datos normalizados
#-----

#-----
# MEDICOS

# Trabajador M03LU
normM03LU <- normalizar(M03LU,7,11)
cbarras.plot(normM03LU) # se ajusta el ylim
ts.interactive(normM03LU,2,6) # 2015-2019
ts.season(normM03LU,2,6) # 2015-2019
corr.pacientes(normM03LU,2,6)

# Trabajador M05M0
normM05M0 <- normalizar(M05M0,7,11)
cbarras.plot(normM05M0) # se ajusta el ylim
ts.interactive(normM05M0,2,6) # 2015-2019
ts.season(normM05M0,2,6) # 2015-2019
corr.pacientes(normM05M0,2,6)
#-----

#-----
# FISICOS MEDICOS

# Trabajador F04EH
normF04EH <- normalizar(F04EH,7,11)
cbarras.plot(normF04EH) # se ajusta el ylim
ts.interactive(normF04EH,2,6) # 2015-2019
ts.season(normF04EH,2,6) # 2015-2019
corr.pacientes(normF04EH,2,6)
#-----

#-----
# TECNICO

# Trabajador T01EE
normT01EE <- normalizar(T01EE,7,11)
cbarras.plot(normT01EE) # se ajusta el ylim
ts.interactive(normT01EE,2,6) # 2015-2019
ts.season(normT01EE,2,6) # 2015-2019
corr.pacientes(normT01EE,2,6)
#-----

#-----
# INGENIERO

# Trabajador I22CR
normI22CR <- normalizar(I22CR,7,11)

```

```
cbarra.plot(normI22CR) # se ajusta el ylim
ts.interactive(normI22CR,2,6) # 2015-2019
ts.season(normI22CR,2,6) # 2015-2019
corr.pacientes(normI22CR,2,6)
#-----
```

ALARA Por sus siglas en inglés, *As Low As Reasonably Achievable*, es decir, «tan bajo como sea posible». Es uno de los principios básicos de la protección radiológica, el cual busca optimizar la exposición a la radiación ionizante tan baja como sea posible. [12](#)

ICRP Comisión Internacional de Protección Radiológica. [11](#) [14](#)

ICRU Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación. [13](#)

KERMA Kinetic Energy Released per unit Mass. [13](#)

LET Transferencia lineal de energía, expresando en keV/ μm . [13](#) [14](#)

LINAC Acelerador lineal (linear accelerator, por sus siglas en inglés). [17](#) [21](#)

OIEA Organismo Internacional de Energía Atómica. [1](#) [7](#) [20](#)

POE Personal ocupacionalmente expuesto. [11](#) [15](#) [16](#) [21](#)

TLD Dosímetro de termoluminiscencia. [15](#) [18](#) [20](#)

Lista de símbolos

λ	Longitud de onda
c	Velocidad de la luz
$D_{T,R}$	Dosis absorbida promedio para la radiación R en el órgano o tejido T
E	Dosis efectiva
f	Frecuencia
$H_p(d)$	Equivalente de dosis personal
$H_{T,R}$	Dosis equivalente en un órgano o tejido T debida a la radiación R
k	Constante de Boltzmann
$K(m)$	KERMA
m_e	Masa del electrón
w_R	Factor de ponderación para la radiación R para la dosis equivalente
w_T	Factor de ponderación para un órgano o tejido
$X(m)$	Exposición ante la radiación ionizante