

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICA**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TITULO**

**ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE AMBIENTAL DE FONDO MEDIANTE  
EL USO DE DOSÍMETROS DE LUMINISCENCIA OPTICAMENTE ESTIMULADA Y  
ANÁLISIS ESPACIAL, ESTUDIO DE CASO DE LA REGIÓN METROPOLITANA.**

**JUAN FRANCISCO ARREDONDO AMIGO**

**SANTIAGO, CHILE  
2017**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICA**

**ESCUELA DE PREGRADO**

**ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE AMBIENTAL DE BACKGROUND  
MEDIANTE EL USO DE DOSÍMETROS DE LUMINISCENCIA OPTICAMENTE  
ESTIMULADA Y ANÁLISIS ESPACIAL, ESTUDIO DE CASO DE LA REGIÓN  
METROPOLITANA.**

**ESTIMATING ENVIRONMENTAL IONIZING RADIATION BACKGROUND THROUGH  
THE USE OF OPTICALLY STIMULATED LUMINESCENCE DOSIMETERS AND SPACE  
ANALYSIS, CASE STUDY OF THE METROPOLITAN REGION.**

**JUAN FRANCISCO ARREDONDO AMIGO**

**SANTIAGO, CHILE  
2017**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICA

ESCUELA DE PREGRADO

**ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE AMBIENTAL DE FONDO MEDIANTE  
EL USO DE DOSÍMETROS DE LUMINISCENCIA OPTICAMENTE ESTIMULADA Y  
ANÁLISIS ESPACIAL, ESTUDIO DE CASO DE LA REGIÓN METROPOLITANA.**

Memoria para optar al Título Profesional de  
Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

**JUAN FRANCISCO ARREDONDO AMIGO**

<b>Profesores Guías</b>	<b>Calificaciones</b>
Luis Morales S Prof. De Ciencias Naturales y Física, Dr.	6,5
Richard Toro A. Químico Ambiental, Dr.	6,5
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Italo Chiffelle G. Bioquímico, Dr.	6,6
María Teresa Varnero M. Químico Farmaceutico.	6,0

SANTIAGO, CHILE  
2017

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Departamento de Ciencias Ambientales de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, en particular al profesor Luis Morales por acceder a patrocinar como profesor guía el presente estudio, quien junto Guillermo Fuentes me ayudaron a salvar los inconvenientes que surgieron en el camino. Y al profesor Richard Toro de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, quien junto a Pablo Ortiz lograron orientar el enfoque de esta memoria de modo que permitiera ser un aporte al estudio de la Radiación en Chile.

A la empresa Nuclear Control Chile, por entregar las facilidades para obtener la información necesaria para el desarrollo de la memoria y especialmente se agradece a Don Rolando Arredondo por la guía y orientación entregada, sin la cual no hubiese sido posible concretar el estudio.

También es pertinente agradecer a las instituciones y personas que facilitaron sus instalaciones para realizar la toma de datos de campo en la Región Metropolitana de Santiago; al Fundo La Rinconda, al campus Antumapu y al Laboratorio Química Ambiental todos ellos de la Universidad de Chile, al Parque Yerba Loca, a la Parroquia de Til-Til, al cuerpo de Bomberos de Buin, a la Parroquia de Curacaví, al Club aéreo de Melipilla, y a quienes resguardaron los detectores en San Carlos de Apoquindo y el Cajón del Maipo.

Por último agradecer a mi esposa María Francisca y mis hijos Vicente y Josefina por el apoyo entregado y la energía que su cariño me ha brindado, sin lo cual no podría haber finalizado de buena forma este estudio.

## 1. ÍNDICE

1. ÍNDICE.....	1
2. ÍNDICE TABLAS .....	4
3. ÍNDICE FIGURAS.....	6
4. RESUMEN .....	8
ABSTRACT.....	9
5. ABREVIATURAS.....	10
6. INTRODUCCIÓN.....	11
7. MARCO TEÓRICO .....	14
7.1.    Naturaleza de la radiación Ionizante.....	14
7.2.    Fuentes de radiación ionizante.....	15
7.3.    Radiación Ionizante Ambiental de Fondo origen y métodos de estimación .....	17
7.4.    Radiación cósmica .....	18
7.4.1.    Naturaleza de la radiación cósmica.....	18
7.4.2.    Estimación teórica de radiación incidente.....	18
7.4.3.    Estimación teórica exposición a radiación cósmica.....	19
7.4.4.    Tipos de tecnología usadas en la dosimetría de Radiaciones Ionizantes .....	19
7.5.    Información técnica del OSL .....	20
7.6.    Utilización del OSL como dosímetro personal .....	21
8. OBJETIVOS .....	22

8.1.	Objetivo General:.....	22
8.2.	Objetivos Específicos:.....	22
9.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
9.1.	Lugar del estudio:.....	23
9.2.	Variables a medir:.....	23
9.3.	Materiales:.....	24
9.4.	Métodos.....	24
9.4.1.	Comparación de resultados.....	24
9.4.2.	Validación del uso de dosímetros OSL para la determinación de la dosis de RIA.....	25
9.4.3.	Medición de la dosis de RIA utilizando dosímetros OSL.....	29
9.4.4.	Elaboración de mapas de distribución de dosis de RIA a la cual se esta expuesto en la región metropolitana.....	32
10.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
10.1.	Validación del uso de dosímetros OSL para la determinación de la dosis de RIA.....	36
10.1.1.	Medición de la dosis acumulada de RIA en el laboratorio de Nuclear Control.....	36
10.1.2.	Calculo teórico de la dosis de RIA en el laboratorio de Nuclear Control.....	37
10.1.3.	Comparación.....	38
10.2.	Medición de la dosis de RIA utilizando dosímetros OSL.....	39
10.2.1.	Medición de la dosis de RIA en la Región Metropolitana.....	39
10.2.2.	Calculo teórico de la dosis de RIA en los lugares de campo.....	41
10.2.3.	Comparación.....	43
10.3.	Elaboración de mapas de distribución de dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana.....	46

10.3.1. Mapa de distribución de la dosis de RIA Teórica a cual se está expuesto en la región metropolitana según datos UNSCEAR.....	46
10.3.2. Mapa de distribución de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana por interpolación de datos campo.....	48
10.3.3. Mapa compensado de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana.....	49
10.3.4. Comparación.....	51
10.4. Recomendaciones a trabajos futuros.....	51
11. CONCLUSIONES.....	53
12. BIBLIOGRAFÍA.....	54
13. ANEXOS.....	57
13.1. Anexo tabla.....	57
13.2. Anexo mapas.....	70

## 2. ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.- Porcentaje radiación recibidas por la población fuente natural de Dosis - mSv (UNSCEAR 2008).....	17
Tabla 2.- Criterios de ubicación de los dosímetros de campo para interpolación.....	29
Tabla 3.- Datos de campos georreferenciados de dosímetros de campo instalados en la Región Metropolitana.....	30
Tabla 4.- Dosis outdoor producto de la radiación cósmica según latitud , tomado de anexo UNSCEAR 2008.....	31
Tabla 5.- Dosis Externa Natural Ionizante mSv / %.....	38
Tabla 6.- Aplicación de estándar ISO 14146:2002 para comparación de dosis anual teórica y estimada. ....	39
Tabla 7.- Datos de campos de la dosis de radiación ionizante ambiental en la Región Metropolitana. ....	40
Tabla 8.- Datos de campos de la dosis de RIA en la Región Metropolitana obtenida mediante la extrapolación a 1 año de los datos de la tabla 6. ....	41
Tabla 9.- Componente cósmica de la tasa de dosis de RIA en los lugares de campo bajo estudio....	42
Tabla 10.- Calculo de la tasa de dosis de RIA a la cual se está expuesto en los lugares de campo de la Región Metropolitana .....	42
Tabla 11.- Cálculo de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en los lugares de campo de la Región Metropolitana a 95 días y un año de exposición. ....	43
Tabla 12.- Aplicación del estándar ISO 14146:2002 para la comparación de la dosis de RIA de los lugares de campo a 95 días de exposición. ....	44



Tabla 13.- Aplicación del estándar ISO 14146:2002 para la comparación de la dosis de RIA estimada mediante interpolación de los lugares de campo a 1 año de exposición.....	45
Tabla 14.- Datos asociadas a las lecturas de dosis de RIA obtenidas con los 148 dosímetros de control ubicados en el laboratorio de nuclear control. ....	57
Tabla 15.- Datos asociadas a los promedios por periodos de exposición de las lecturas de dosis de RIA obtenidas con los 148 dosímetros de control ubicados en el laboratorio de nuclear control. ....	65
Tabla 16.- Comparación mapa mediante estándar de dosis teórica y de campo en 95 días.....	68
Tabla 17.- Comparación mapa mediante estándar de dosis compensada y de campo en 95 días.....	68
Tabla 18.- Comparación mediante estándar de dosis teórica y de campo Anual.....	69
Tabla 19.- Comparación mediante estándar de dosis compensada y de campo Anual.....	69

### 3. ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Tipos de daños en seres humano, producto de la exposición a radiación..... **¡Error!**

**Marcador no definido.**

Figura 2: Penetración radiación, fuente L Morron 2014.....15

Figura 3: Fuente de Radiación a Público UNSCEAR 2008.....16

Figura 4: Tecnología OSL InLight® comportamiento del Oxido de Aluminio dopado con carbono.  
.....21

Figura 5: Ciudad de Santiago y la Región Metropolitana con coordenadas 33°26'16 Sur y 70° 39'01  
Oeste. ....23

Figura 6: Dosimetro OSL y lector Landauer utilizado en el estudio. ....24

Figura 7: Representación gráfica de las dosis de RIA registradas por los dosímetros OSL utilizados  
como control de laboratorio. ....26

Figura 8: Resumen gráfico de la estadística descriptiva del conjunto de datos de dosis de RIA  
registradas por los dosímetros OSL utilizados como control de laboratorio. ....27

Figura 9: Ubicación de los lugares de campo escogidos para el estudio. ....30

Figura 10: Esquema para la determinación teórica de la RIA en la Región Metropolitana.....33

Figura 11: Esquema para la determinación de la distribución de la RIA en 95 días y anual según  
datos de campo.....34

Figura 12: Metodología para obtener mapa compensado de RIA en la Región Metropolitana.....35

Figura 13: Representación gráfica de los datos experimentales promediados de las dosis de RIA  
acumulada. ....36

Figura 14: Modelo distribución de dosis Teórica de exposición RIA en 95 días Región  
Metropolitana.....47

Figura 15: Modelo distribución de dosis Teórica de exposición RIA Anual Región Metropolitana.	47
Figura 16: Modelo interpolado de distribución de dosis de exposición RIA en 95 días Región Metropolitana.....	48
Figura 17: Modelo interpolado de distribución de dosis de exposición RIA en Anual Región Metropolitana.....	49
Figura 18: Modelo Compensado de distribución de dosis de exposición RIA en 95 días Región Metropolitana.....	50
Figura 19: Modelo Compensado de distribución de dosis de RIA Anual Región Metropolitana.....	50

#### 4. RESUMEN

El presente trabajo es presentado como un aporte al estudio de la radiación ionizante en Chile y en particular busca colaborar en la discusión del tema de la radiación ionizante ambiental (RIA), el cual ha sido un área de investigación poco explorada a nivel nacional. Para lo anterior se analizó la Región Metropolitana de Santiago como una experiencia de aprendizaje que permitió dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿Cómo varía la radiación ambiental en las diferentes zonas de la Región Metropolitana de Santiago?. Ésta pregunta surge de la necesidad de conocer cómo afecta la radiación ambiental al monitorear las dosis de los trabajadores que se ven expuestos a radiación ionizante en sus puestos de trabajo.

El estudio consistió en tres fases, primero, confirmar la factibilidad de utilizar dosímetros OSLInLight® de Luminiscencia Ópticamente Estimulada con el fin de monitorear RIA y utilizarlos para determinar una expresión matemática que relacione la dosis de RIA en función del tiempo. Para esto, se realizó una recta de regresión a partir de los datos de dosis de fondo mensuales almacenados en dosímetros OSL InLight® de los últimos 4 años en la Región Metropolitana determinando una dosis de 0,66 mSv anual. Mediante el uso de la recta de regresión y puntualmente para el año 2014-2015 se registró una dosis promedio de 0,68 mSv con una desviación estándar de 0,03.

En la segunda fase se instalaron dosímetros OSL en 10 puntos de muestreo en la Región Metropolitana, con los que se registró la dosis de RIA por un período de 3 meses entre Agosto y Octubre de 2015. Esta información fue evaluada y contrastada con la dosis teórica según lo establecido por el Comité Científico de Naciones Unidas para los efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), llegando a probar que existe variabilidad geográfica en la dosis de RIA, en donde se registró un promedio de dosis de 0,66 mSv con una desviación estándar de 0,02. Registrando 0,67 mSv al norte y 0,62 mSv al sur de la región, mientras que en altitud fueron 0,67 mSv bajo los 200 msnm y sobre los 1700 msnm fueron 0,70 mSv.

Por otra parte, se confirmó la factibilidad de usar los dosímetros OSL como elemento de medición, ya que al aplicar el estándar de intercomparación ISO 14146:2002 utilizado por el Instituto de Salud Pública de Chile, se encontró que las dosis de RIA registradas fueron similares a las teóricas.

La tercera y última fase del estudio permitió generar un modelo de distribución de dosis de RIA para la Región Metropolitana que combina la variabilidad geográfica de la Región y los datos de campo obtenidos en este trabajo. Para esto, se utilizaron los programas de análisis de imágenes y modelamiento Idrisi, Surfer y R, con los cuales se generaron modelos según: 1.- los parámetros teóricos de la UNSCEAR, 2.- la interpolación de los datos de campo registrados con los dosímetros OSL y 3.- un modelo compensado de distribución el cual se obtuvo al promediar los datos de los dos modelos anteriores. De estos tres tipos de modelos el de mejor calidad fue el compensado, ya que consolidó de manera efectiva los datos de campo con la variabilidad geográfica. Esto lo convierte en un buen estimador de la distribución de dosis de RIA en la Región Metropolitana de Santiago.

**Palabras Claves:** *Radiación Ionizante Ambiental, Dosimetría de Radiaciones, Dosímetro OSL InLight®,*

## ABSTRACT

The present research intends to contribute to the studying of ionizing radiation in Chile mainly seeking to collaborate with the discussion of environmental ionizing radiation (EIR), area that has been underexplored in our country. The Santiago Metropolitan Region was analyzed as a learning experience, answering the following question: How does the environmental radiation vary in different zones of Santiago Metropolitan Region? This question arises from the need to know how EIR affects the monitoring of laboral dosimetry in workers exposed to ionizing radiation in their jobs.

The study consisted of three phases, first, to confirm the feasibility of using OSLInLight® Optically Stimulated Luminescence dosimeters in order to monitor RIA and use them to determine a mathematical expression that relates the dose of RIA as a function of time. For this, a regression line was made from the monthly background dose data stored in OSL InLight® dosimeters of the last 4 years in the Metropolitan Region establishing a dose of 0.66 mSv per year, by using linear regression function. Years 2014-2015 registered an average dose of 0.68 mSv with a standard deviation of 0.03.

In the second phase OSL dosimeters were installed in 10 sampling points in the Metropolitan Region, with which RIA dose was recorded for a period of 3 months between August and October 2015. This information was evaluated and contrasted with the theoretical dose established by the United Nations Scientific Committee for the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), proving that there is geographical variability in the doses of RIA with a mean dose of 0.66 mSv with a standard deviation of 0.02. Recording 0.67 mSv to the north and 0.62 to the south of the region, and in altitude were 0.67 mSv under 200 meters above sea level (MASL) while over 1700 MASL were 0.70 mSv. On the other hand, the feasibility of using the OSL dosimeters as a measurement element was confirmed, since applying the ISO 14146: 2002 intercomparison standard used by the Public Health Institute of Chile, it was found that the doses of RIA registered were similar to the theoretical ones.

The third and last phase of the study allowed the generation of a RIA dose distribution model for the Metropolitan Region that combines the geographical variability of the Region and the field data obtained in this work. For this, we used the image analysis and modeling programs Idrisi, Surfer and R, generating models according to: 1.- the theoretical parameters of UNSCEAR, 2.- interpolation of the registered field data with the OSL dosimeters and 3.- a compensated distribution model which was obtained by the arithmetic mean of the data of the two previous models. Of these three types of models the compensated one was the most accurate, since it effectively consolidates the field data with the geographical variability. This makes a good estimator of RIA dose distribution in the Metropolitan Region of Santiago.

**KeyWords:** *Environmental Ionizing Radiation, Radiation Dosimetry, OSL InLight® Dosimeter,*

## 5. ABREVIATURAS

- ATSDR: Agencia para Sustancia Tóxicas y el Registro de Enfermedades (EEUU)
- CChen: Comisión Chilena de energía nuclear.
- CUBEPRO: Curso Básico de Protección Radiológica Operacional (CChen)
- DDE: Equivalente de dosis profunda. (en Ingles)
- HPS: Sociedad de Física de la Salud. (en Ingles)
- ICRU: Comisión Internacional de Unidades de Medidas y Radiación. (en Ingles)
- ININ: Instituto Nacional de Investigación Nuclear. (México)
- ISO: Organización Internacional de Normalización. (en Ingles)
- ISPCh: Instituto de Salud Pública de Chile.
- OMS: Organización Mundial de la Salud.
- OSL: Luminiscencia Ópticamente Estimulada. (en Ingles)
- RIA: Radiación Ionizante Ambiental.
- RPII: Instituto de Protección Radiológica de Irlanda. (en Ingles)
- RIVM: Instituto Nacional de Salud Pública de Holanda. (en Holandes)
- mSv: MiliSievert, unidad de medición del SI de radiación absorbida por la materia viva.
- TLD: Dosímetro Termo Luminiscente. (en Ingles)
- UNSCEAR: Comité Científico de Naciones Unidas para los efectos de la Radiación Atómica.

## 6. INTRODUCCIÓN

Cuando existen partículas y/o rayos con gran cantidad de energía que les permiten desplazar los electrones de moléculas con las que interactúan, se manifiesta el proceso de la ionización (ATSDR, 1999). Este tipo de radiación no se puede detectar mediante ninguno de los sentidos humanos, por lo que se deben usar instrumentos especiales como cámaras de ionización, contadores Geiger-Muller o dosímetros personales para determinar si se está expuesto a ella y medir los niveles de exposición.

La radiación ionizante puede producir daños en la estructura que constituye los organismos biológicos, por medio de la transferencia de energía a las moléculas y elementos químicos que conforman las células, pudiendo ionizar elementos celulares así como generar nuevos compuestos perjudiciales que rompen el equilibrio bioquímico llegando en algunos casos al colapso celular. (CChen CUBEPRO, 2015)

Por otra parte el efecto que tiene en el material genético (ADN) existente en la célula afectada, puede producir una alteración en la transmisión de información genética incompleta o incorrecta a las futuras células e individuos de la especie, o bien a la mutación en un oncogén o en un gen supresor de tumores, lo cual puede derivar en la producción de cáncer o teratogénesis.

Los efectos nocivos de la radiación ionizante en la salud se clasifican como estocásticos y determinísticos (Figura 1).

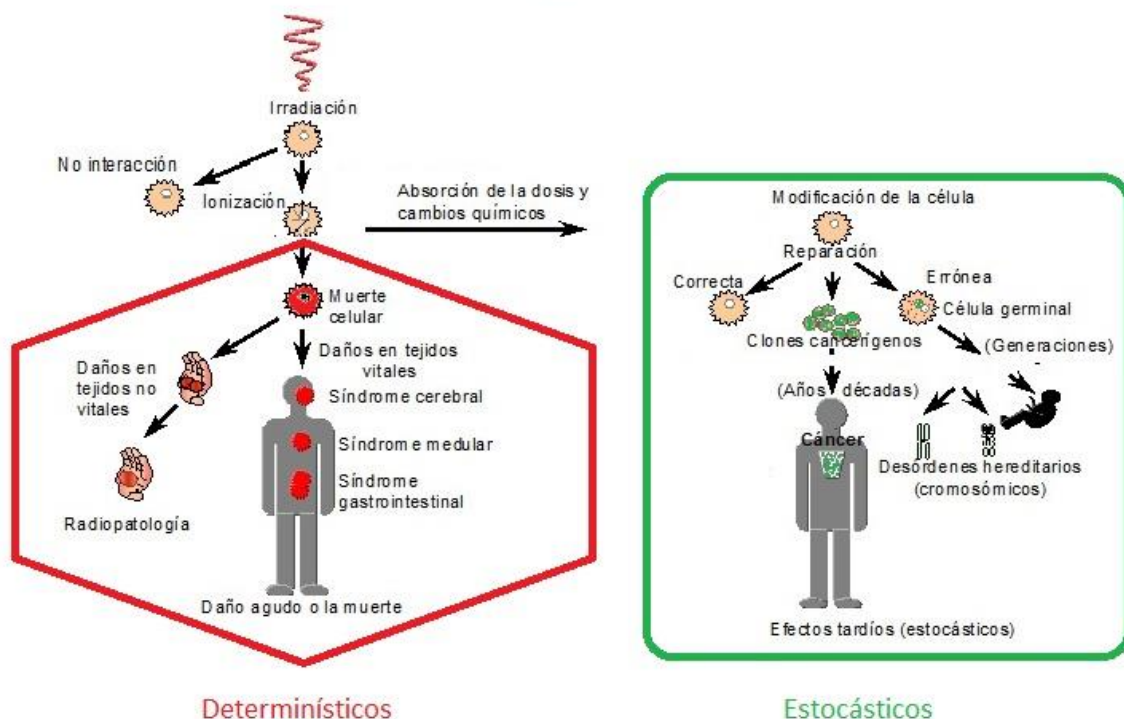


Figura 1: Tipos de daños en seres humano, producto de la exposición a radiación.

Son determinísticos cuando el daño se correlaciona directamente en frecuencia y gravedad con las dosis, y tienen un umbral mínimo por debajo del cual no se observan efectos a nivel clínico. Y son efectos estocásticos, los que no tienen un umbral de dosis conocido y su probabilidad de ocurrencia aumenta conforme lo hacen la dosis en el tiempo.

Debido a que los individuos expuestos pueden llegar a presentar problemas de salud tanto en el corto como en el largo plazo (CASCON, 2009), se hace necesario que la exposición ocupacional de los trabajadores que están afectados a ella, deba ser controlada por autoridades competentes a nivel nacional y por organizaciones externas, para así poder tomar medidas oportunas con vista a mejorar los sistemas y las instalaciones en que se desempeñan. Estableciendo normas legales, métodos y medidas para prevenir o minimizar los riesgos que podrían derivarse de la exposición a las radiaciones ionizantes (CChen, 2015).

La optimización de las diferentes prácticas conducentes a disminuir las dosis individuales y colectivas se denomina Protección Radiológica, la cual tiene como uno de sus elementos esenciales el monitoreo de las radiaciones ionizante a las que está expuesta la población, y últimamente el Comité Científico de Naciones Unidas para los efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR) ha extendido este concepto a los seres vivos en general.

A modo de ejemplo, la empresa Nuclear Control Chile en el análisis de las dosis que ha registrado dentro de los últimos 4 años, ha detectado diferencias significativas entre las dosis obtenidas por personal que se desempeña en similares condiciones en distintos lugares geográficos de Chile. Lo cual se podría deber a la variación de la dosis ambiental base a lo largo del país, situación que ha sido detectada ya que esta empresa en su proceso de monitoreo de dosis de radiaciones ionizantes, cuenta con dosímetros testigos de laboratorio los cuales están expuestos solo a la radiación ambiental o de fondo, los cuales son usados para determinar la dosis efectiva producto directamente del desempeño laboral del individuo monitoreado.

La Radiación Ionizante Ambiental (RIA) base o de Fondo proviene de muchas fuentes naturales y antrópicas siendo las segundas no muy relevantes en Chile, por lo cual toma mayor relevancia el comportamiento de la fuentes naturales. Estas son materiales radiactivos presentes en el medio como los radionúclidos en suelo, agua y aire que son inhalados e ingeridos por la población y le irradian internamente. Sumándose a estos las radiaciones provenientes desde el medio externo geológico o cósmico (HPS, 2010).

Al recabar mayor información respecto a la RIA en Chile, se llega a la conclusión de que existe un vacío de conocimiento en este tema a nivel nacional ya que esta variable no ha sido evaluada con suficiente detalle, encontrándose solo el trabajo “Natural radiation external exposures levels in Chilean Sub-Antarctic and country stations”, realizado por Stuardo (1988), quien realizó una descripción puntual en 8 lugares del territorio nacional, estimación que es incompleta según estándares actuales de la UNSCEAR. Por otra parte los estudios globales tienden a no detallar los países con baja densidad poblacional o que carecen de fuentes de radiación artificiales importantes (UNSCEAR, 2008). Para el caso Chileno no existe un estudio formal que aborde el tema de la Radiación ionizante de Fondo o ambiental como las existentes en países del hemisferio norte, como en Irlanda, donde la incorporan en su análisis de exposición a radiación de la población (RPII, 2014).



En base a lo anterior, la presente memoria generó un modelo de distribución espacial de las Dosis de Radiación Ionizante Ambiental (RIA) para la Región Metropolitana de Santiago por medio de datos históricos de radiación ambiental registrados en los laboratorios de Nuclear Control y datos empíricos de terreno detectados mediante tecnología OSL, además de información estándar utilizada por Naciones Unidas para estos fines. Aprovechando la Radiación cósmica como un insumo esencial para determinar la distribución espacial de la RIA ya que, como señala Mora (1999), uno de los componentes principales de la radiación natural de fondo es la cósmica. Lo anterior es una forma de aportar a la gestión en protección radiológica y actualizar la información existente en lo referente a la Radiación Ionizante Ambiental de Fondo a nivel regional, estableciendo un precedente que puede ser replicado al resto del territorio.

## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Naturaleza de la radiación Ionizante

La radiación ionizante del tipo nuclear es un tipo de energía liberada por los núcleos atómicos en sus procesos de estabilización el cual se lleva a cabo mediante la liberación al medio, de paquetes de energía y/o de partículas subatómicas. Estos tipos de radiación se pueden caracterizar a su vez según la forma como afectan la materia a nivel macroscópico, rompiendo enlaces químicos y desplazando electrones de los átomos y moléculas con que interactúan ionizando por este método la materia (ATSDR). En la actualidad es posible su agrupación de la siguiente manera:

1. **Radiación alfa  $\alpha$ :** Radiación corpuscular que consiste en la emisión de núcleos de helio ( $\text{He}^{++}$ ), formados por dos protones y dos neutrones provenientes de un núcleo atómico inestable, la cual es poco penetrante siendo incapaz de atravesar una hoja de papel debido a su gran masa y carga eléctrica, pero con alto grado de ionización por lo cual puede ocasionar daños severos al organismo si una fuente de este tipo es ingerida.
2. **Radiación beta  $\beta$ :** Radiación corpuscular compuesta de electrones emitidos en el proceso de desintegración beta de la nube de electrones, tiene menor poder de ionización pero su penetración es mayor dada la menor masa de los electrones que la producen.
3. **Neutrones:** radiación corpuscular compuesta de neutrones emitidos en la colisión de átomos o en la desintegración espontánea de elementos radiactivos, tiene un gran poder de penetración debida a su alta energía y ausencia de carga eléctrica.
4. **Radiación gamma  $\gamma$ :** radiación electromagnética, la cual se compone de fotones de alta energía generados en la reorganización energética del núcleo una vez emitida la radiación  $\alpha$  o  $\beta$ , son los más penetrantes de los tipos de radiación descritos, atraviesan fácilmente la piel y otras sustancias orgánicas, por lo que puede causar graves daños en órganos internos.
5. **Los rayos X:** radiación electromagnética, que se componen también de fotones de alta energía de origen extra-nuclear cuyo comportamiento es similar a los gamma pero con una capacidad de penetración menor (CChen CUBEPRO, 2015).

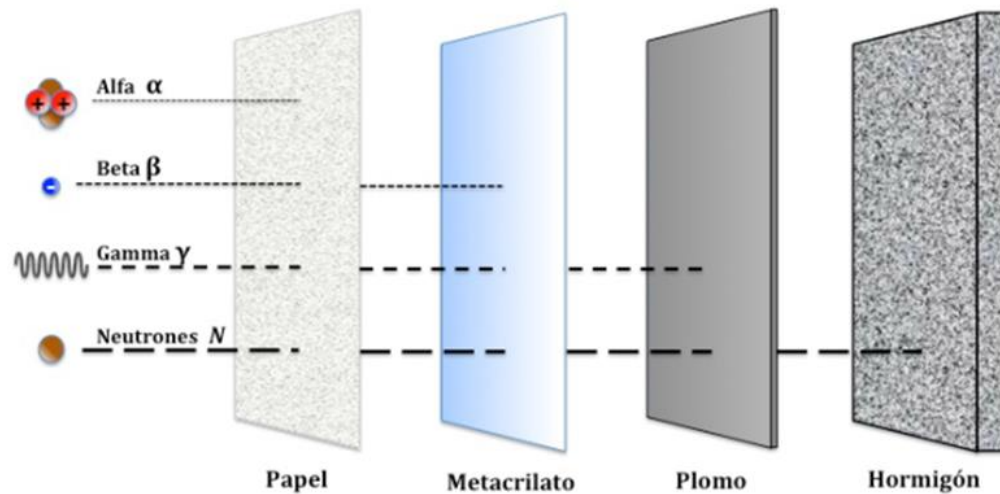


Figura 2: Penetración radiación, fuente L Morron 2014.

## 7.2. Fuentes de radiación ionizante

El consenso científico establecido en el UNSCEAR ha definido como fuentes de irradiación para el público toda aquella irradiación tanto natural como producida por actividades humanas que puede afectar a la población y que no tenga relación directa con el ámbito laboral de esta (Figura 3). Diferenciando las de origen natural y las que son producidas debido a las acciones humanas como efecto de las diferentes industrias que hacen uso de elementos radioactivos como el uso de rayos x diagnósticos y radioisótopos en medicina y otras industrias con fines pacíficos, sumados a la utilizada en el ámbito militar (RIVM 2003).

### Fuente de radiación a público UNSCEAR (2008)

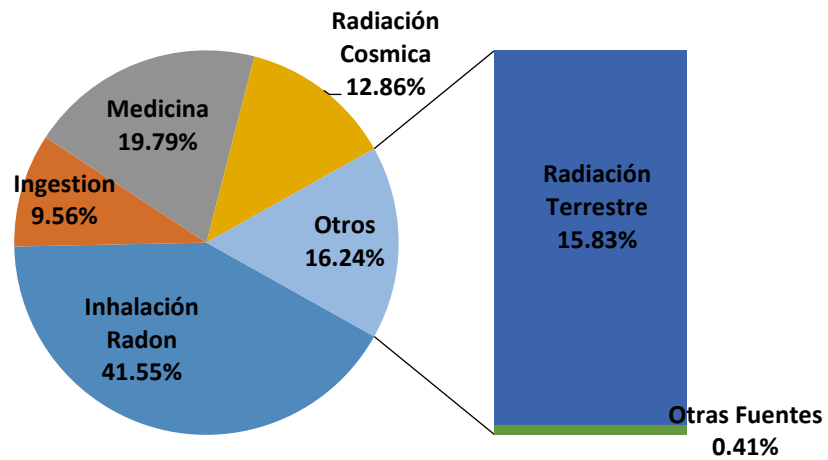


Figura 3: Fuente de Radiación a Público UNSCEAR 2008.

Sin embargo, el mayor aporte a la irradiación de la población se debe a la acción de las fuentes naturales que son responsables de al menos el 80% de las dosis recibidas al año según el UNSCEAR. Estas se generan debido al constante bombardeo del planeta con partículas de alta energía provenientes desde el espacio, las cuales a su vez generan partículas secundarias en la baja atmósfera y a la irradiación proveniente de los radionucleidos primordiales existentes en la corteza terrestre y el medio ambiente en general.

### 7.3. Radiación Ionizante Ambiental de Fondo origen y métodos de estimación

Según lo anterior se han desarrollado diversos estudios e investigaciones que tiene por fin determinar la cantidad de dosis de radiación recibidas por la población humana tanto en diversas localidades como por ejemplo las Islas Canarias en el marco de la Tesis Doctoral de Miguel Angel Arnedo en 2014 o bien países, como el ya nombrado ejemplo de Irlanda donde se evalúa la variación periódicamente. A la vez que a nivel global se establece un consenso mundial por parte del Comité Científico de Naciones Unidas para los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR) quien actualiza periódicamente los datos y metodología a usar, definiendo para las fuentes de tipo natural los aportes que se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Porcentaje radiación recibidas por la población fuente natural de Dosis - mSv (UNSCEAR 2008).

<b>Fuente Natural de Dosis</b>	<b>mSv</b>	<b>%</b>
Cósmica ionizante	0,28	11,57
Neutrón cósmico	0,1	4,13
Radionúclidos cósmicos	0,01	0,41
Terrestre	0,48	19,83
Inhalación Radon y Uranio	1,26	52,07
Ingestión K y Uranio	0,29	11,98
<b>Total dosis Natural</b>	<b>2,42</b>	<b>100,00</b>

La exposición pública a fuentes de radiación es cuantificada mediante el concepto de “Dosis efectiva” aun cuando este término estrictamente fue desarrollado para ser usado en el ámbito de la Radioprotección ya que considera el daño potencial producto de la energía recibida. Según lo anterior el UNSCEAR define la dosis efectiva natural a que se ve expuesta la población como la suma de las dosis producidas por fuentes internas ( $E_{in}$ ) y externas ( $E_{ex}$ ) al organismo evaluado, expresándose lo anterior según la ecuación 1.

$$E_f = E_{ex} + E_{in} \quad (1)$$

Se consideran como fuentes de irradiación internas a los elementos radiactivos que ingresan al interior del organismo bien por vía aérea o siendo ingeridas oralmente en alimentos y líquidos, mientras que en las fuentes naturales externas se agrupan en las debidos a radionúclidos cósmicos, neutrones cósmicos, radioisótopos naturales presentes en la tierra y la radiación cósmica de tipo ionizante sobre la cual se ahondará más debido a la naturaleza de esta memoria.

## 7.4. Radiación cósmica

### 7.4.1. Naturaleza de la radiación cósmica

La radiación denominada como cósmica se refiere a todas aquellas partículas y energía electromagnética de tipo ionizante que llegan a la superficie de la tierra, pudiendo ser partículas primarias cuando son directamente de origen extraterrestre provenientes del sol, de las bandas de Van Allen, o bien provenientes del espacio profundo. Así como originadas en la interacción de estas últimas con los isótopos estables que se encuentran en la atmósfera terrestre (partículas secundarias) (RPII, 2014).

Tanto las partículas primarias como secundarias están en permanente interacción con la atmósfera viéndose disminuida la energía con que llegan a la superficie terrestre, por lo cual se manifiesta un efecto decreciente del aporte a la dosis de fondo global a medida que disminuye la altitud sobre el nivel del mar (UNSCEAR 2008). Ahora bien dado que principalmente esta radiación se compone de partículas cargadas (protones), su distribución se ve afectada a nivel latitudinal por el campo magnético de la tierra lo cual produce que su efecto sea más notorio en los polos que cerca del ecuador (ININ 2011).

### 7.4.2. Estimación teórica de radiación incidente

Dado que la naturaleza de la radiación cósmica que llega a la tierra se ve afectada por variables geográficas, como la altitud y latitud, pero para efectos globales las fuentes se pueden considerar constantes. La literatura muestra que se desarrollaron una serie de investigaciones y experimentos con el fin de obtener un estimador de la cantidad de energía que se recibe por hora. Estas investigaciones fueron discutidas en diferentes foros internacionales, obteniéndose como consenso en el UNSCEAR el modelo matemático descrito por Bouville & Lowder (1988), el cual estima la tasa de radiación en nano Sievert por hora, la cual se detalla a continuación en la ecuación 2.

$$E_z = E_0 \cdot [0,21 \cdot e^{-1,649z} + 0,79 \cdot e^{0,4528z}] \quad (2)$$

Donde:  $E_0$  = Radiación al Nivel del Mar y  $z$  = altura en Kilometros medida desde nivel del mar.

### 7.4.3. Estimación teórica exposición a radiación cósmica

Se ha establecido por convención internacional (UNSCEAR 2000 y NCRP 1987b), el aplicar una separación según la exposición sea “INDOOR” y “OUTDOOR” para la Radiación Cósmica. Para el caso INDOOR se debe aplicar a la dosis directa cósmica un factor de corrección por blindaje (fb) de 0,8 por el tipo de material promedio en que se resguarda la población mundial a la vez que otro (fi) 0.8 por el tiempo que transcurre a resguardo, mientras que la parte OUTDOOR se obtiene al aplicar una corrección del 0,2 que corresponde al tiempo que la población mundial se encuentra en el exterior (fe). (DW. Moeller DW, Sun LS, 2006). Esta relación se resumen según la expresión matemática de la ecuación 3.

$$\text{Dosis Rad Cós efec} = [\text{Dosis Cósmica Indoor} + \text{Dosis Cósmica Outdoor}] \quad (3)$$

$$\text{Dosis Rad Cós efec} = [(\text{Dosis Cósmica directa} \times \text{fb} \times \text{fi}) + (\text{Dosis Cósmica directa} \times \text{fe})] \quad (4)$$

$$\text{Dosis Rad Cós efec} = [(\text{Dosis Cósmica directa} \times 0,8 \times 0,8) + (\text{Dosis Cósmica directa} \times 0,2)]$$

$$\text{Dosis Rad Cós efec} = \text{Dosis Cósmica directa}[(0,8 \times 0,8) + (0,2)]$$

$$\text{Dosis Rad Cós efec} = \text{Dosis Cósmica Directa}[0,84] \quad (5)$$

### 7.4.4. Tipos de tecnología usadas en la dosimetría de Radiaciones Ionizantes

Dado que la radiación ionizante no puede ser detectada por los sentidos humanos, y que los efectos de la exposición a ella sólo son notorios una vez que se han alcanzado umbrales críticos de daño, se han desarrollado diversas técnicas de detección y medición para facilitar su estudio, y también la gestión del daño que produce.

A nivel Mundial el Monitoreo de personal según el Informe UNSCEAR 2008, es de cerca de 23 millones de personas, recibiendo una dosis colectiva anual de 42000 Sv producto de su desempeño laboral. Esta dosis colectiva la encabezan los 13 millones de trabajadores que se desempeñan en las industrias con mayor exposición RIA con presencia de radón, como por ejemplo la minería en donde dicho componente aumenta considerablemente las dosis a las que se ven expuestos. Por otra parte los 10 millones restantes de trabajadores están expuestos a la radiación de fuentes artificiales principalmente de equipos de rayos X e isótopos radiactivos, que se incluyen en el uso por parte del sector médico, en el ciclo del combustible nuclear, así como en varios usos industriales y actividades militares.

El monitoreo de la radiación externa a que se ven expuestos todos los trabajadores se lleva a cabo utilizando dosímetros de tipo personal, que incluyen; dosímetros de termoluminiscencia (TLD), dosímetros luminiscentes estimulados ópticamente (OSLDs), dosímetros de radio-fotoluminiscentes (RPLDs) y dosímetros de película.

Así la dosimetría personal se empezó a desarrollar a mediados de la década de 1950, utilizando un dosímetros de película con una serie de filtros, así como cámaras de ionización de bolsillo para el monitoreo de rutina del día a día. Luego en la década de 1960 y 1970 se desarrollaron sistemas de supervisión de personal mediante TLD los cuales

alcanzaron gran aceptación y uso, debido a su alta sensibilidad y el desarrollo de lectores automáticos.

Sin embargo, el empuje del desarrollo en la dosimetría luminiscente moderna se realizó más hacia la luminiscencia estimulada ópticamente OSL, que no requiere calefacción del detector y, por tanto, elimina por completo los problemas de temple térmico asociado en el modo de TL de lectura.

El uso de OSL como técnica de personal de la dosimetría se inició a mediados de 1990, con el desarrollo de  $Al_2O_3: C$  por Akselrod, y más tarde se desarrolló su investigación de idoneidad para el uso de la dosimetría personal pulsada-OSL (POSL) para la estimulación por Akslerod y McKeever en 1999.

Desde entonces dosímetros OSL están encontrando cada vez más aplicaciones en el ámbito de personal y vigilancia del medio ambiente, así como en el campo de la física médica. Otro sistema de dosimetría ópticamente estimulada importante son los dosímetros de vidrio radio photo luminescent (RPL). Sistemas totalmente automáticos de dosimetría RPL desarrollaron en 1980 son capaces de medir la dosis en el rango de  $10\mu Sv$  a  $10 Sv$ .

El daño depende tanto del tiempo de exposición, así como también del tipo de radiación y de la sensibilidad de los diferentes órganos y tejidos; por esta razón, es que se ha estandarizado el Sievert (Sv), equivalente a un Joule por kilogramo ( $J Kg^{-1}$ ) como una medida internacional para su cuantificación y monitoreo por parte de las instituciones que velan por este tema (OMS, 2012).

## **7.5. Información técnica del OSL**

La tecnología OSL InLight® se basa en el comportamiento del Oxido de Aluminio dopado con carbono (Figura 4), donde la radiación ionizante incidente hace que los electrones de los átomos se exciten y salten de las órbitas internas de valencia a las externas de conducción en las que son capturados en “trampas” de Carbono. Estos electrones son “liberados” al ser excitados nuevamente con luz blanca, la que les provee de la energía necesaria para volver a su estado original de valencia, emitiendo fotones al medio, proceso que ha sido descrito por Akselrod y McKeever en 1999. Los fotones liberados se detectan mediante un tubo fotomultiplicador, convirtiéndolos en pulsos eléctricos que se registran electrónicamente, permitiendo detectar dosis en un gran espectro desde los  $0,01 mSv$  sin saturarse en altas dosis (Landauer, 2010).



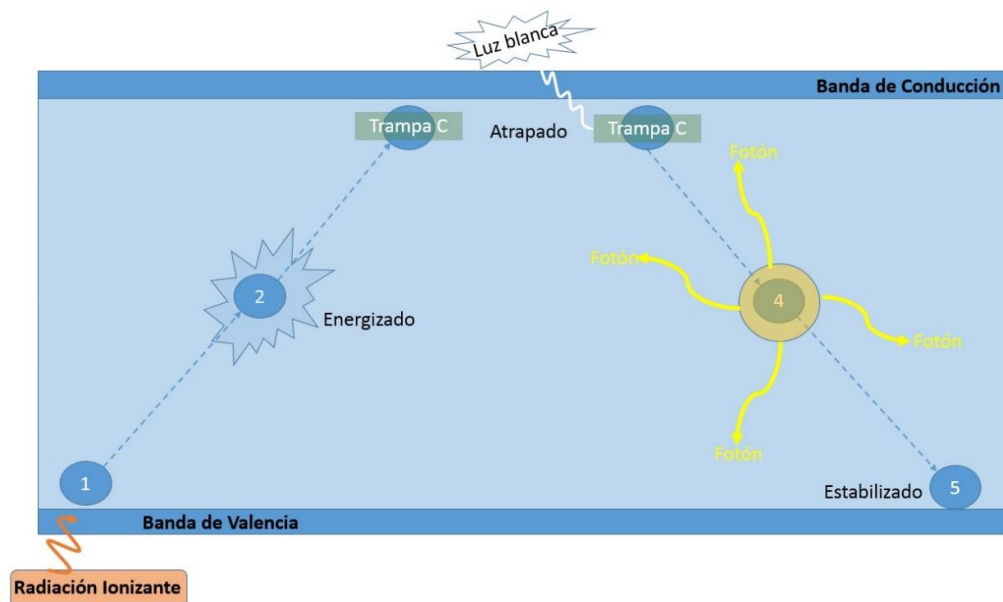


Figura 4: Tecnología OSL InLight® comportamiento del Oxido de Aluminio dopado con carbono.

El uso de detectores del tipo OSL permite realizar lecturas y relecturas de un mismo aparato sin verse afectada mayormente la dosis obtenida de este. Ya que la naturaleza de la técnica OSL extrae en cada proceso de lectura solo parte de la información contenida en los detectores, lo cual permite que la deflexión sea inferior al 0,4% de la señal almacenada según lo estableció Ford, Hanify y Perks en 2004.

### 7.6.Utilización del OSL como dosímetro personal

Por otra parte, para asegurar un buen monitoreo de las dosis personales, se debe asegurar que los elementos detectores no se encuentran con información almacenada correspondiente a fuentes ya evaluadas, por lo cual se deben someter a un proceso de borrado o annealing que devuelva a un estado de estabilidad a todos los electrones atrapados en la “trampa” de carbono.

El proceso de borrado consiste en una sobreexcitación de los detectores de óxido de aluminio con luz blanca por periodos de tiempo mayor al de las lecturas de modo que se les transfiera a todos los electrones la energía necesaria para volver de la capa de conducción a la de valencia. Este procedimiento se realiza en todos los dosímetros que se utilizarán para detectar dosis en un periodo determinado, procurando guardar un grupo de estos como control de laboratorio los cuales no son expuestos a fuentes de radiación, por lo cual solo toman la dosis de fondo que se utilizará para corregir las dosis detectadas por los dosímetros utilizados en el control personal.

## **8. OBJETIVOS**

### **8.1.Objetivo General:**

Estimar la distribución de la dosis de radiación ionizante ambiental (RIA) de fondo en la Región Metropolitana, mediante dosímetros OSL y radiación ionizante ambiental teórica.

### **8.2.Objetivos Específicos:**

- I. Estimar empíricamente la tasa de irradiación ionizante ambiental al interior de un laboratorio en la ciudad de Santiago mediante tecnología OSL.
- II. Estimar la dosis teórica de radiación ionizante ambiental de la Región Metropolitana según parámetros de UNSCEAR.
- III. Analizar el grado correspondencia entre la estimación de RIA teórica y la obtenida empíricamente.
- IV. Generar un modelo de distribución de la dosis de radiación ionizante ambiental de la Región Metropolitana.

## 9. MATERIALES Y MÉTODOS

### 9.1. Lugar del estudio:

El estudio considera la ciudad de Santiago y la Región Metropolitana con coordenadas 33°26'16 Sur y 70° 39'01 Oeste.

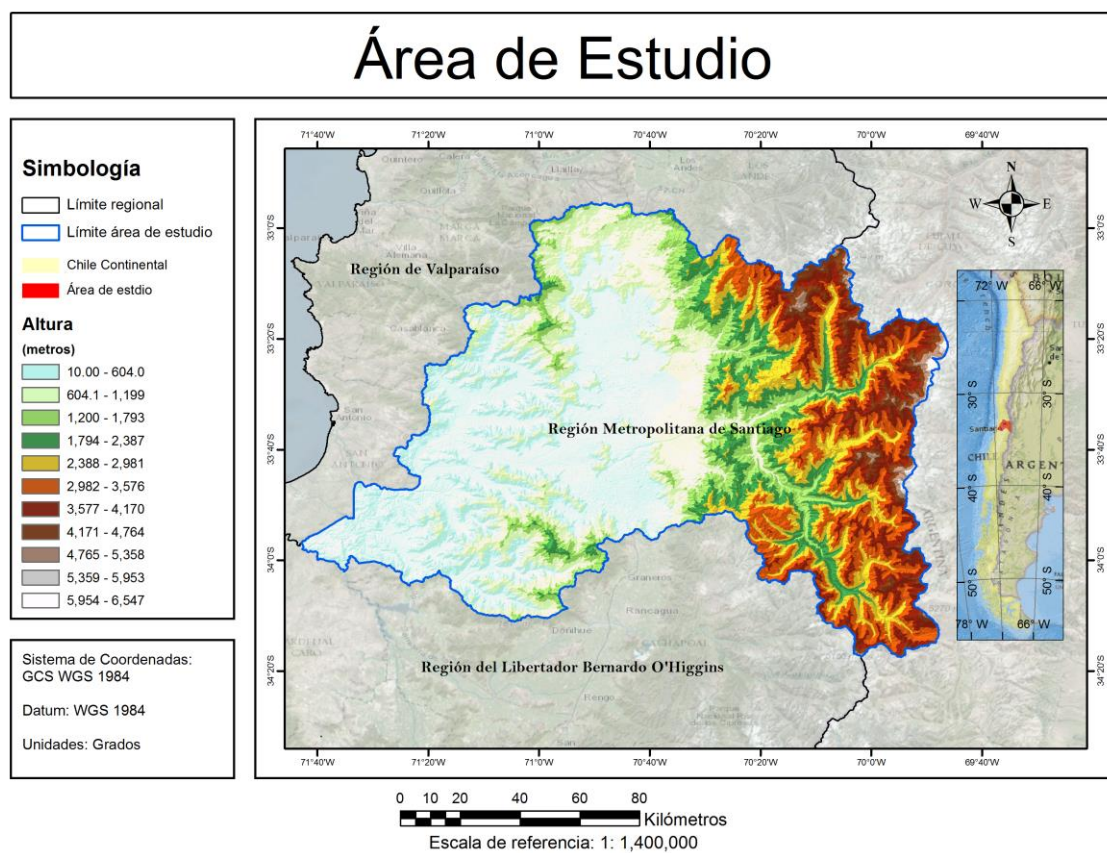


Figura 5: Ciudad de Santiago y la Región Metropolitana con coordenadas 33°26'16 Sur y 70° 39'01 Oeste.

### 9.2. Variables a medir:

Radiación Ionizante Ambiental (Sivert).

### 9.3. Materiales:

La empresa Nuclear Control ha puesto a disposición sus dosímetros OSL In light LDR modelo 2 para la elaboración de esta memoria, junto con el lector automático Landauer (Figura 6) utilizado para la cuantificación de la dosis RIA medida por cada detector.



Figura 6: Dosímetro OSL y lector Landauer utilizado en el estudio.

### 9.4. Métodos

A continuación se presentan las metodologías que fueron llevados a cabo para el desarrollo de esta tesis. Estas pueden ser separadas en cuatro: primero la metodología utilizada para contrastar los resultados obtenidos a lo largo del estudio, siguiendo un estándar reconocido como válido internacionalmente para tomar decisión en el ámbito de la dosimetría externa. Luego se presenta la metodología que nos permite confiar en el uso de los dosímetros OSL como detectores válidos para cuantificar la dosis de RIA, también se detalla la metodología implementada para la medición de la dosis de RIA en los lugares de campo analizados en este estudio y por último la metodología mediante la cual se confeccionó los mapas de RIA.

#### 9.4.1. Comparación de resultados

Dado que se debió realizar la comparación entre los resultados obtenidos mediante los diversos métodos de estimación de RIA usados en la elaboración del estudio, a la vez que fue necesario contar con un criterio de aceptación que permitiera decidir si los distintos métodos de estimación son válidos. Se procedió a utilizar para estos fines, el estándar ISO 14146:2002, el cual es aplicado a nivel internacional por las autoridades regulatorias al momento de realizar la evaluación de los laboratorios de dosimetría personal. (Ferrufino, Discacciatti y Lopez 2013).

La aplicación de este estándar considera evaluar si el cociente entre el valor medido  $H_m$  y el valor de referencia  $H_r$  el cual se asume como correcto o real cae dentro del rango de aceptación. Dicho rango es definido por la ecuación 6, donde los límites máximos y mínimos son calculados en base a; al valor de referencia  $H_r$ , y el valor mínimo de registro  $H_0$  que define el grado de significancia.

$$\frac{1}{1,5} \left( 1 - \frac{2H_0}{H + H_r} \right) \leq \frac{H_m}{H_r} \leq 1,5 \left( 1 + \frac{H_0}{2H_0 + H_r} \right) \quad (6)$$

El estándar se aplicó como elemento de decisión y análisis a lo largo del estudio, considerando siempre como valor mínimo de registro  $H_0 = 0,1$  mSv. El cual fue definido por del Instituto de Salud Pública de Chile (ISPCh) en su ORD N°1893 de 2010, cabe señalar que el ISPCh es la autoridad nacional en materia de dosimetría personal externa.

#### **9.4.2. Validación del uso de dosímetros OSL para la determinación de la dosis de RIA**

En esta subsección se presenta el método que permite confirmar el uso del dosímetro OSL como un detector válido para llevar a cabo la cuantificación de dosis de RIA. El procedimiento consistió en analizar mediante el Lector automático Landuer los dosímetros de control ubicados en las oficinas de Nuclear Control, los cuales han estado expuestos a radiación ambiental por periodos de tiempos desde 1 a 48 meses, y los resultados obtenidos se compararon con una predicción teórica mediante la aplicación del estándar ISO14146:2002.

La dosis considerada en todos los análisis, fue la DDE o efectiva de cuerpo entero, según la recomendación ICRU REPORT 47, y que corresponde a la dosis estimada a 10 mm del tejido, la cual ha sido usada en estudios sobre dosimetría ambiental como el publicado por Aguerre et al 2006.

##### **9.4.2.1. Medición de la dosis acumulada de RIA en el laboratorio de Nuclear Control**

El comportamiento de la Radiación Ionizante Ambiental (RIA) de fondo en el tiempo se determinó empíricamente mediante un análisis estadístico descriptivo de las dosis registradas en los dosímetros OSL utilizados como control de laboratorio, los cuales han sido expuestos sólo a la radiación ambiental por periodos de tiempo de 1 a 48 meses.

Dado que las fuentes de irradiación naturales se encuentran permanentemente emitiendo radiación al medio ambiente y que el aporte global de las fuentes artificiales se puede considerar como constante en el tiempo a escala planetaria, se debe considerar que jamás

los detectores pueden registrar dosis iguales a cero. Por este motivo, se hace necesario establecer escalas de medición de tipo relativa, es decir un cero relativo, con la lectura de dosis de RIA absorbida a tiempo cero por cada dosímetro, esto es inmediatamente después de ser borrado el dosímetro o idealmente antes de ponerlo en operación. En la práctica, esto es llevado a cabo utilizando dosímetros patrones y de testigo en los laboratorios de dosimetría.

La empresa Nuclear Control puso a disposición para la elaboración de esta memoria sus dosímetros de control de laboratorio que registran la dosis de fondo debida a la RIA desde el momento en que fueron borrados, existiendo elementos detectores que almacenan información desde Enero de 2009 hasta la actualidad.

Los dosímetros de control fueron leídos todo en un mismo proceso, procurando incluir un grupo de dosímetros borrados el mismo día de la lectura, que representaron la exposición en el tiempo cero. Obteniéndose las dosis acumuladas para cada uno de los dosímetros, desde el momento que fueron borrados .

En la Tabla 13 de la sección 13.1. Anexo tablas; se muestran los datos obtenidos de la dosis de RIA que registraron los dosímetros y el tiempo en meses que estos estuvieron acumulando información. En la Figura 7 se presenta la gráfica del conjunto de datos considerando los meses de exposición y en la Figura 8 un resumen de la estadística descriptiva del conjunto de datos evaluados.

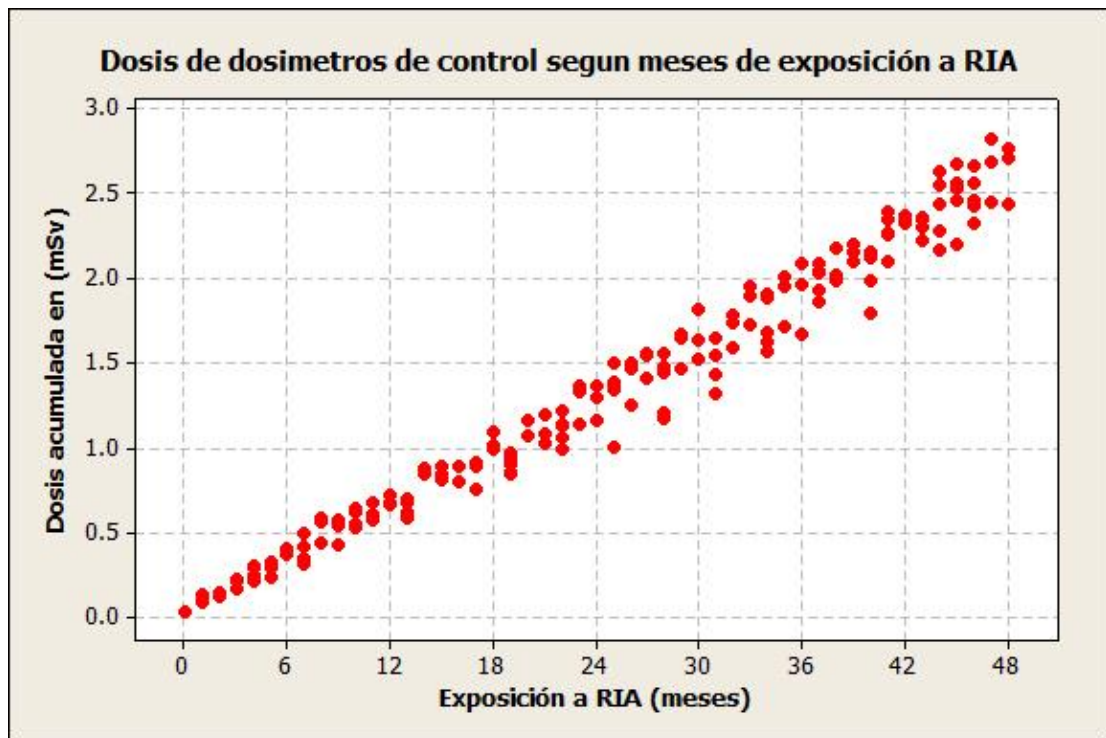


Figura 7: Representación gráfica de las dosis de RIA registradas por los dosímetros OSL utilizados como control de laboratorio.

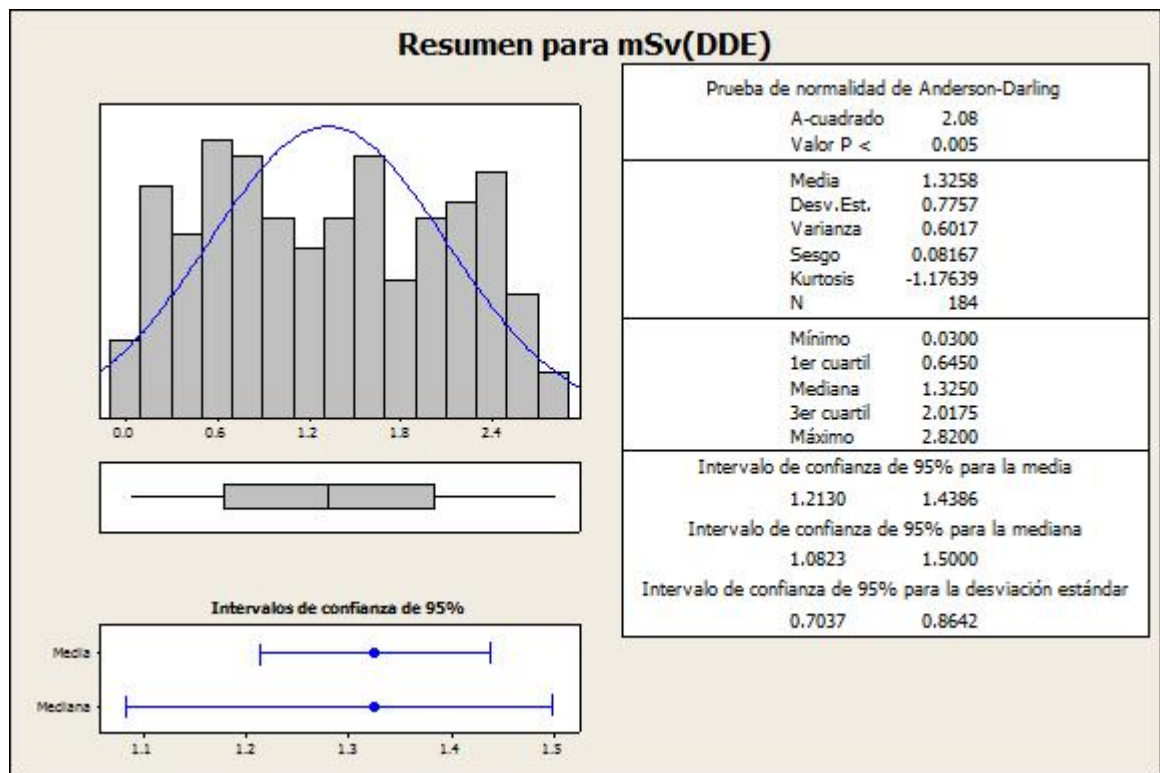


Figura 8: Resumen gráfico de la estadística descriptiva del conjunto de datos de dosis de RIA registradas por los dosímetros OSL utilizados como control de laboratorio.

Con el fin de caracterizar el comportamiento de la dosis de RIA como un función del tiempo de exposición, se promediaron los valores de la dosis asociadas a cada periodo de exposición y luego mediante el método de mínimos cuadrados se realizó una regresión lineal que permite predecir el comportamiento de la Dosis de RIA acumulada en el tiempo. Con este resultado se estimó la dosis de RIA acumulada durante el periodo de un año. Se debe aclarar que esta dosis ha sido registrada en un estado de control 100% “Indoor”, por lo cual para la comparación con las predicciones teóricas se consideró el efecto del “Blindaje” de los pisos superiores del edificio en que se encuentra el laboratorio.

#### 9.4.2.2. Calculo teórico de la dosis de RIA en el laboratorio de Nuclear Control

Utilizando la Ecuación (2) se calculó la componente cósmica de la tasa de dosis de RIA en nanoSievert por hora a la que se está expuesto en el laboratorio de Nuclear Control. Dicha ecuación corresponde al cálculo matemático que establece como estándar UNSCEAR y depende de la altitud a la cual se encuentre el lugar de interés.

Entonces, considerando que la Región Metropolitana de encuentra a 33° de latitud, la radiación ionizante es 32 nSv a nivel del mar, y como el laboratorio de Nuclear Control se haya a 678 msnm (636 msnm según datos cartográficos de la ubicación del edificio donde se encuentra la oficina más las altura debido a que esta se encuentra en un catorceavo piso), la tasa de dosis de RIA directa debido a la componente cósmica a la cual se está expuesto en el laboratorio es de,

$$D_{\text{cósmica}} = 36,51 \frac{nSv}{h}$$

Lo cual se puede expresar en milisivert para la determinar la dosis anual según se muestra a continuación en la ecuación 7.

$$D_{\text{cósmica}} = 0,32 \frac{mSv}{año} \quad (7)$$

Como la tasa de dosis de RIA presentada en la ecuación (7) corresponde a la dosis directa, fue necesario determinar la dosis efectiva a la cual se ve expuesta las instalaciones de Nuclear Control, lo cual se realizó utilizando la ecuación (4).

Como se presentó en la Tabla 1 en la sección 7.3 la contribución de las diversas fuentes a la dosis de RIA de fondo total son consideradas como constantes. De este modo, la dosis de RIA asociada a alguna de dichas fuentes se relaciona con la dosis de RIA total como se indica en la siguiente ecuación,

$$D_{\text{Fuente}} = D_{\text{Total}} \cdot \left( \frac{\% \text{ _ aporte _ fuente}}{100} \right)$$

En particular, la componente cósmica de la dosis de RIA satisface que,

$$D_{\text{Cósmica}} = D_{\text{Total}} \cdot \left( \frac{\% \text{ _ aporte _ Cósmico}}{100} \right)$$

Por medio de esta última ecuación, si se conoce la dosis de RIA cósmica, es posible determinar la dosis RIA total según se indica a continuación,

$$D_{\text{Total}} = D_{\text{Cósmica}} \cdot \left( \frac{100}{\% \text{ _ aporte _ Cósmico}} \right) \quad (8)$$

Entonces, utilizando la ecuación (8) se procedió a calcular la tasa por hora de la dosis de RIA total a la que está expuesto el laboratorio de Nuclear Control, con lo cual se estimó la Dosis absorbida durante un año. Este valor se contrastó con el experimental, estimado desde la ecuación de la recta construida a partir de los datos experimentales en la sección previa.



### 9.4.3. Medición de la dosis de RIA utilizando dosímetros OSL

Esta subsección contiene la metodología seguida para la medición de los datos de campo de la dosis de RIA en la Región Metropolitana, junto con los lugares escogidos como puntos de muestreo. También se detalla el método para obtener las predicciones teóricas, las cuales fueron comparadas con los resultados experimentales mediante el estándar detallado en la sección 9.4.1

#### 9.4.3.1. Medición de la dosis de RIA para la Región Metropolitana de Santiago.

Se escogieron 10 sectores dentro de la Región Metropolitana para realizar la medición de las dosis de RIA. La ubicación de los dosímetros de campo se definió teniendo en cuenta recoger diferentes altitudes sobre el nivel del mar y distintos grados de urbanización, además de que los sitios elegidos contaran con resguardo para los detectores, ya que debían acumular información durante 3 meses. A continuación, en la Tabla 2, se muestran los datos asociados a los sectores escogidos y en la Figura 9 se muestra la distribución de los lugares de campo.

Tabla 2.- Criterios de ubicación de los dosímetros de campo para interpolación.

Urbanización	Altitud	Comuna	Descripción
Muy baja	Alta	San José	Melosas
Baja	Media	La Pintana	Antumapu (U. de Chile)
Alta	Media	Las Condes	San Carlos Apoquindo
Alta	Media	Macul	Facultad de Ciencias (U. de Chile)
Media	Media	Curacaví	Plaza Curacaví
Baja	Baja	Melipilla	Aeródromo Melipilla
Muy baja	Alta	Lo Barnechea	Yerba Loca
Baja	Baja	Maipú	Rinconada de Maipú (U. de Chile)
Media	Baja	Buín	Cuartel de Bomberos
Baja	Media	Tiltil	Plaza Tiltil

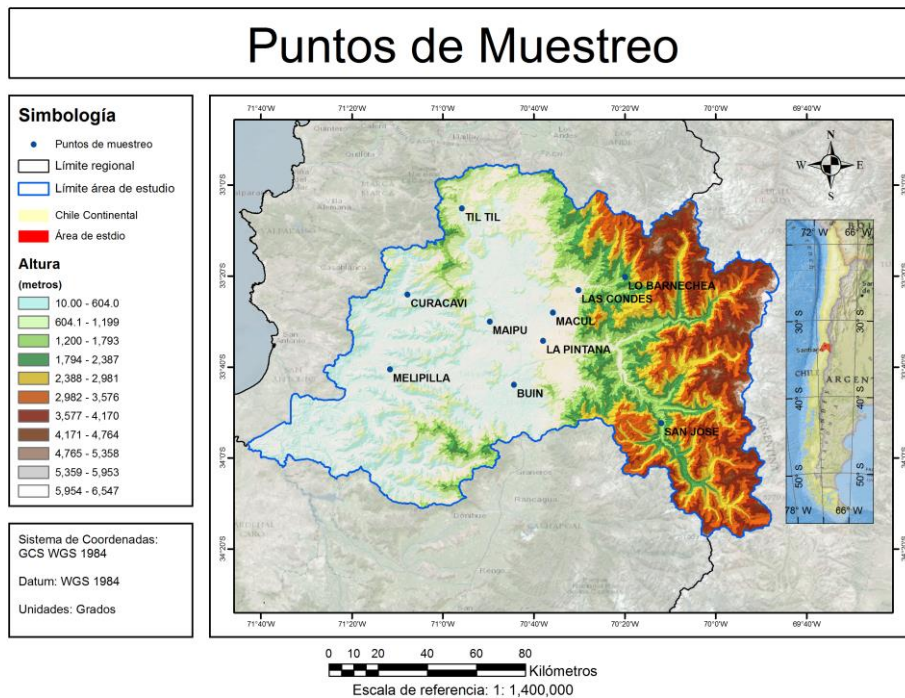


Figura 9: Ubicación de los lugares de campo escogidos para el estudio.

En cada uno de estos sectores se instaló un dosímetro OSL para la medición de la dosis de RIA acumulada durante un periodo de 95 días. A continuación, en la Tabla 3, se presentan los datos asociados a los dosímetros y a los lugares de campo específicos.

Tabla 3.- Datos de campos georreferenciados de dosímetros de campo instalados en la Región Metropolitana

Ubicación		Altitud	Ubicación	Dosímetro
Long	Lat	msnm	Comuna	Serial
-71,192908	-33,6757717	167	MELIPILLA	XA02207404Q
-71,129227	-33,4013562	200	CURACAVI	XA02797250A
-70,8276608	-33,5004827	445	MAIPU	XA02594654Z
-70,7394641	-33,7315896	482	BUIN	XA02275969O
-70,9295472	-33,086164	573	TIL TIL	XA02877039I
-70,5960199	-33,4678887	578	MACUL	XA027975108
-70,6325543	-33,5706267	622	LA PINTANA	XA02593974S
-70,5021077	-33,3859065	908	LAS CONDES	XA02881231H
-70,1986127	-33,8726069	1492	SAN JOSE	XA02407384I
-70,3325465	-33,3378449	1744	LO BARNECHEA	XA025933728

Los datos fueron sometidos a una comparación con la predicción teórica suponiendo 95 días de exposición. Luego, utilizando la recta de regresión determinada en la sección 10.1.1 que representa la tendencia del incremento de la dosis RIA en función del tiempo, se procedió a realizar una extrapolación suponiendo un año de exposición, resultado que también se comparó con la predicción teórica.

#### 9.4.3.2. Calculo teórico de la dosis de RIA en los lugares de campo

Utilizando la Ecuación (2) se calculó la componente cósmica de la tasa de dosis de RIA, en nanoSievert por hora, a la que se está expuesto en los lugares de campo bajo estudio. Considerando que la Región Metropolitana de encuentra a 33° de latitud, y tomando como referencia lo establecido por la UNSCEAR en su anexo científico donde se definió una tasa de la componente cósmica de la Dosis de RIA a nivel del mar de 32 nSv/h, lo cual se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.- Dosis outdoor producto de la radiación cósmica según latitud , tomado de anexo UNSCEAR 2008.

Latitud (grados)	Población según rango latitud (%)		Tasa de dosis efectiva (nSv/hr)	
	Hemisferio Norte	Hemisferio Sur	Componente Ionizante	Componente Neutrónico
80-90	0,00	0,00	32	11,0
70-80	0,00	0,00	32	11,0
60-70	0,40	0,00	32	10,9
50-60	13,7	0,50	32	10,0
40-50	15,5	0,90	32	7,80
30-40	20,4	13,0	32	5,30
20-30	32,7	14,9	30	4,00
10-20	11,0	16,7	30	3,70
0-10	6,30	54,0	30	3,60
Total	100	100		
Promedio poblacional ponderado				
Hemisferio Norte			31,0	5,6
Hemisferio Sur			30,3	4,0
Mundial			30,9	5,5

Al igual como se indicó, en la subsección 9.4.2.2, la dosis de RIA total en término de la componente cósmica de la dosis de RIA puede ser determinada mediante la siguiente expresión,

$$D_{Total} = D_{C\acute{o}smica} \cdot \left( \frac{100}{\% \text{ _ aporte _ C\acute{o}smico}} \right) \quad (8)$$

Entonces, utilizando la ecuación 8 calculó la tasa de dosis RIA total a la que se está expuesto en los distintos lugares de campo bajo estudio. Con estos resultados se estimó la

dosis de RIA absorbida durante 95 días de exposición y a un año de exposición. Estos resultados fueron comparados con los valores experimentales obtenidos.

#### **9.4.4. Elaboración de mapas de distribución de dosis de RIA a la cual se esta expuesto en la región metropolitana.**

En esta subsección contiene la metodología seguida para la elaboración de los mapas de distribución de las dosis de RIA de la región Metropolitana según los datos de obtenidos de la aplicación desde la UNSCEAR, a la vez que utilizando los datos de campo. También se muestra el método para obtener un mapa que combine la información teórica con la de campo, el cual fue analizado mediante el estandar de comparación de dosimetría ya detallado en la sección 9.4.1.

##### **9.4.4.1. Mapa de distribución de la dosis de RIA Teórica a cual se esta expuesto en la región metropolitana según datos UNSCEAR**

Mediante el uso del Software Idrisi Andes y su módulo de álgebra de mapas se generó un mapa del componente cósmico de la RIA al aplicar la ecuación 2.

$$E_z = E_0 \cdot [0,21 \cdot e^{-1,649z} + 0,79 \cdot e^{0,4528z}] \quad (2)$$

Donde:  $E_0 = 32$  nSv y  $z =$  altura en kilometros desde nivel del mar, obtenida de un modelo de elevación de la región metropolitana. Este mapa de fue ponderado utilizando la ecuación 8. en el mismo modulo del software y la información contenida en el Anexo B del informe de 2008 del UNSCEAR respecto a los porcentajes de aportes de las diversas fuentes a la RIA.

$$D_{Total} = D_{C\acute{o}smica} \cdot \left( \frac{100}{\% \_ aporte \_ C\acute{o}smico} \right) \quad (8)$$

Con este mapa fue posible calcular la dosis de RIA teórica absorbida durante 95 días de exposición y a un año de exposición.

La Figura 10, representa un esquema de cómo se realizó la estimación de la RIA para la Región Metropolitana mediante la componente cósmica.

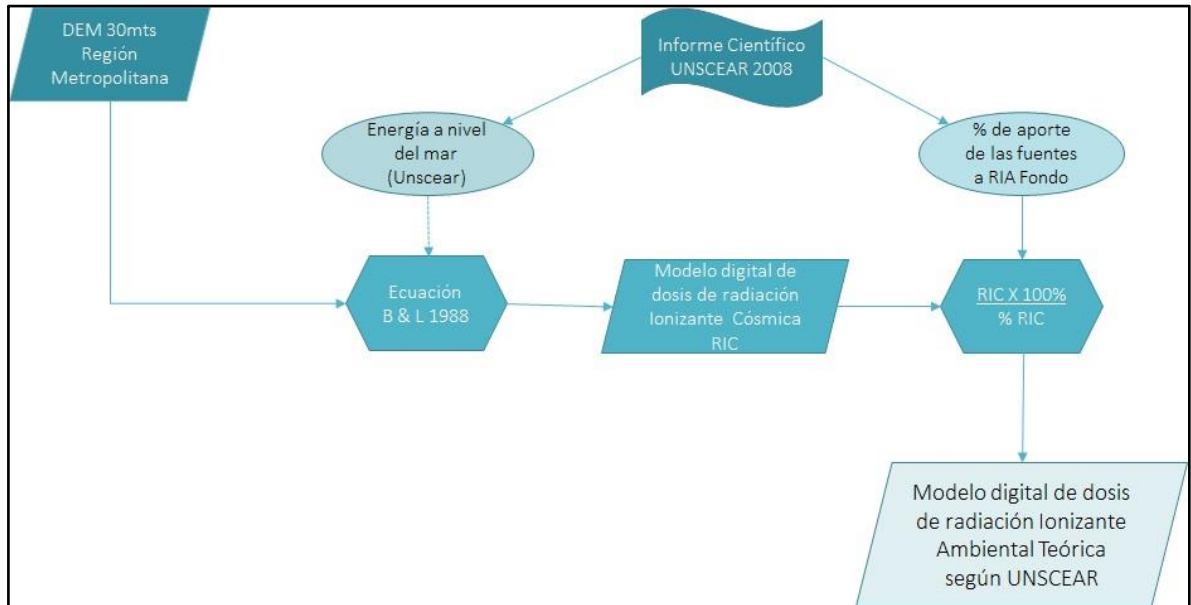


Figura 10: Esquema para la determinación teórica de la RIA en la Región Metropolitana.

#### 9.4.4.2. Mapa de distribución de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana por interpolación de datos campo.

Con los resultados de la dosis de RIA en los 10 puntos de campos, obtenidas en la tabla 6. de la subsección 10.2.1, se procedió a generar un modelo de distribución de la dosis de 95 días de exposición de RIA para la Región Metropolitana. Para lo cual se utilizó el método de interpolación geoestadística Kriging, el cual permitió predecir un valor de dosis en aquellas posiciones donde no hubo medición, teniendo en cuenta la estructura de la covarianza de las dosis y de la ubicación espacial de estas. Este método se asemeja a realizar una regresión lineal múltiple aplicada al contexto espacial, logrando ser el mejor estimador lineal insesgado, es decir con valor esperado de error cero (Reyes 2010).

De igual forma se procedió con los datos de la tabla 7. de la subsección 10.2.1 para elaborar el mapa de distribución de dosis anual de RIA en la región metropolitana.

La Figura 11 presenta un esquema de cómo se realizó la modelación de la RIA de la Región Metropolitana a partir de los datos de campo de 95 días registrados con los dosímetros.

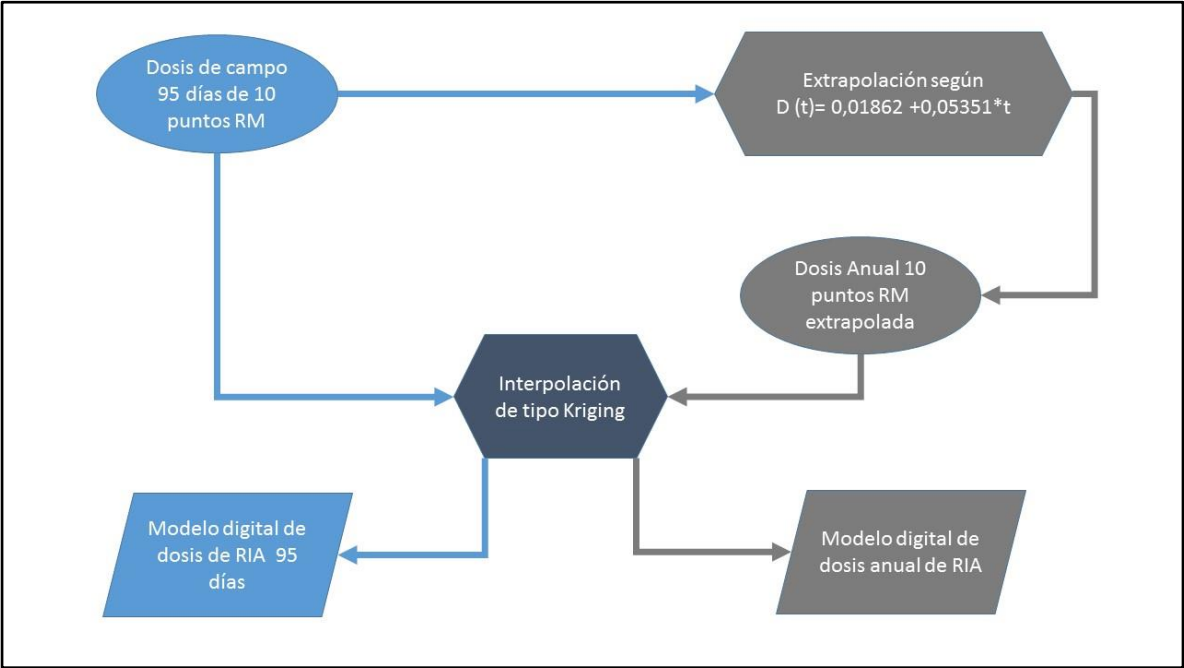


Figura 11: Esquema para la determinación de la distribución de la RIA en 95 días y anual según datos de campo.

#### 9.4.4.3. Mapa compensado de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana

Con el fin de determinar la distribución de las dosis producto de la RIA en la Región Metropolitana, y que dicha distribución considere la geomorfología de la región así como la relación determinada por los resultados de campo. Se procedió a realizar la determinación de nuevos valores de dosis para la Región, por medio del promedio entre la estimación teórica de dosis, que hace uso de los datos de altitud de la región y la interpolación de los datos de campos realizada por el método kriging. Operación la cual se realizó por medio de un Software de análisis espacial como se muestra en la Figura 12.

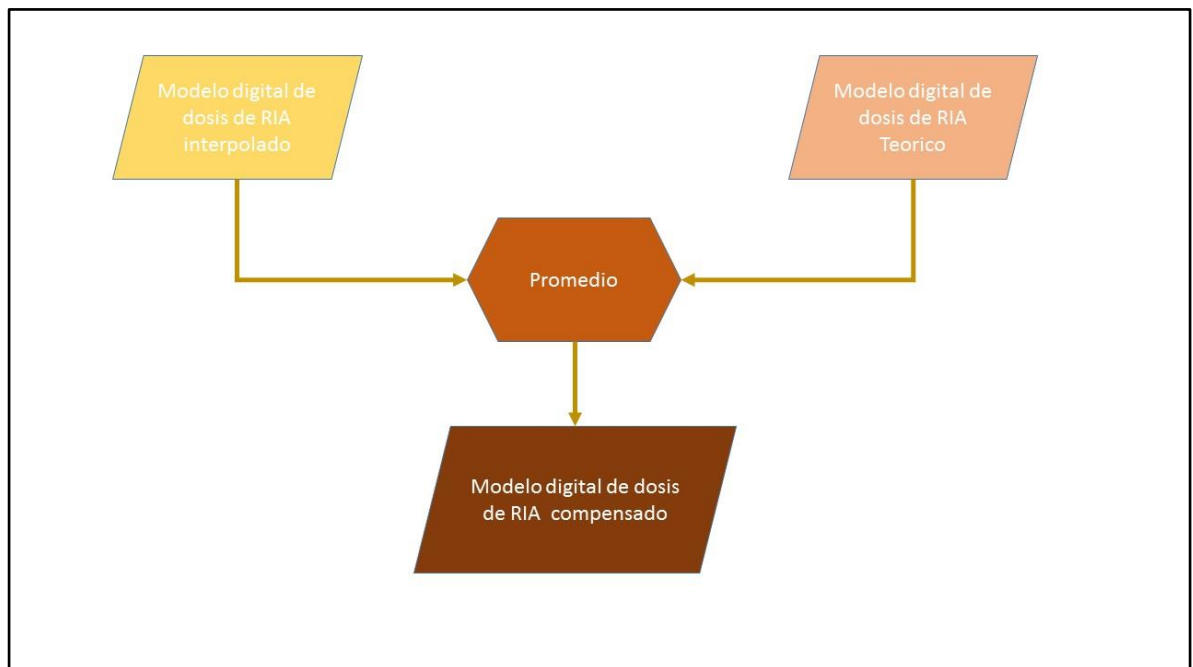


Figura 12: Metodología para obtener mapa compensado de RIA en la Región Metropolitana.

## 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 10.1. Validación del uso de dosímetros OSL para la determinación de la dosis de RIA

#### 10.1.1. Medición de la dosis acumulada de RIA en el laboratorio de Nuclear Control

Con el fin de caracterizar el comportamiento de la dosis de RIA como una función del tiempo de exposición, se promediaron los valores de la dosis asociada a cada periodo de exposición. En la Tabla 14, en la sección 13.1 Anexo tablas., se presentan los valores de los promedios de la dosis de RIA asociada a cada periodo de acumulación. Luego, mediante el método de mínimos cuadrados se hizo una regresión lineal para determinar el comportamiento de la Dosis de RIA acumulada en el tiempo. En la Figura 13 se muestra la representación gráfica de los promedios de la dosis de RIA asociada al número de meses que se encontraron midiendo los dosímetros. También se presenta el resultado de la regresión lineal realizada al conjunto de datos.

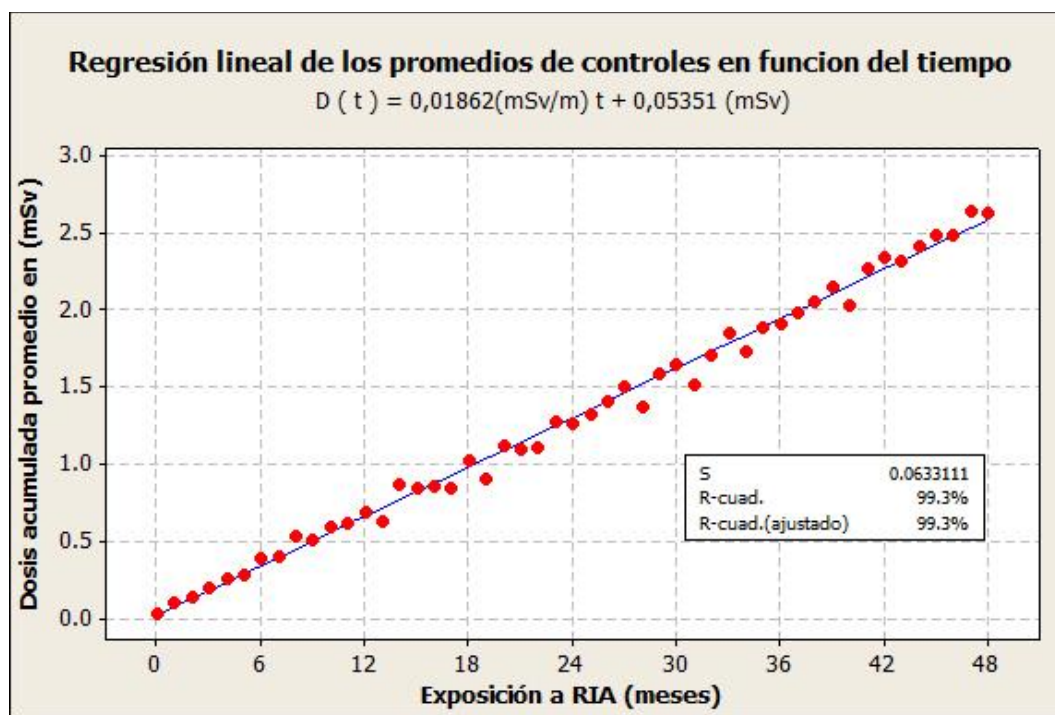


Figura 13: Representación gráfica de los datos experimentales promediados de las dosis de RIA acumulada.



Al aplicar el método de mínimos cuadrados al conjunto de datos se encontró que la recta que mejor ajusta a dicho conjunto es la dada por ecuación 10,

$$\begin{aligned}\frac{dD}{dt} &= k & (10) \\ D(t) &= D_0 + k \cdot t \\ D(t) &= 0,01862 + 0,0535 \cdot t\end{aligned}$$

Donde  $t$  corresponde al tiempo bajo exposición en meses ( $m$ ).

Podemos observar en el gráfico y en el resultado obtenido para el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 99.3% que la mayoría de los puntos están perfectamente alineados, quedando todos muy cercanos a la recta que representa la regresión, sin embargo entre los meses 13 y 41 se presenta una dispersión considerable en varios puntos que se ubican por debajo de la recta de tendencia. Lo cual podría influir en que los valores estimados mediante la recta puedan ser numéricamente menores a lo detectados.

Esto se puede constatar al utilizar la recta de estimación y comparar el resultado con los datos empíricos, así según la regresión la dosis de RIA absorbida durante 12 meses de exposición debiese ser,

$$D(12) = 0,66 \text{ mSv.}$$

Mientras que si consideramos el valor obtenido directamente de los datos presentados en la Tabla 16 de la sección 13.1. Anexo tablas., tenemos que,

$$D(12) = 0,68 \text{ mSv,}$$

Siendo este último mayor en un 3% al valor obtenido mediante la interpolación, lo cual desde un punto de vista de dosis de RIA es despreciable, por lo cual la recta obtenida es una buena forma de predecir la variación de Dosis de RIA en el tiempo, que detectan los dosímetros OSL.

Pero puede ser de interés realizar a futuro algún trabajo de depuración de datos o bien de confeccionar una nueva recta de regresión mediante alguna metodología que minimice esta variación.

### **10.1.2. Calculo teórico de la dosis de RIA en el laboratorio de Nuclear Control**

Como la tasa de dosis de RIA determinada en la sección 9.4.2.2 y presentada en la ecuación (7) corresponde a la dosis directa (0,32 nSv/hr), es decir con el dosímetro a la intemperie, se debió determinar la dosis efectiva a la cual se está expuesto en las instalaciones de Nuclear Control, es decir considerar los efectos de blindaje y los tiempos de exposición efectiva a la RIA cósmica. Este cálculo se realizó utilizando la ecuación (4) y considerando

que  $f_b=0,8$ ,  $f_i=1$  y  $f_e=0$ , ya que la exposición de los dosímetros es completamente indoor. Con estas consideraciones en cuenta, la dosis de RIA cósmica efectiva al interior de las instalaciones de Nuclear Control es,

$$D_{\text{C\u00f3smica efectiva}} = [0,32(0,8 \cdot 1) + (0,32 \cdot 0)]$$

$$D_{\text{C\u00f3smica efectiva}} = 0,256 \frac{mSv}{a\u00f1o}$$

Ahora, utilizando la ecuaci\u00f3n (8), que es presentada a continuaci\u00f3n,

$$D_{\text{Total}} = D_{\text{C\u00f3smica}} \cdot \left( \frac{100}{\% \text{ _ aporte _ C\u00f3smico}} \right) \quad (8)$$

y la informaci\u00f3n proporcionada en la Tabla 4, la cual muestra los aportes de las diversas fuentes a la dosis RIA que pueden ser detectadas por el dos\u00edmetro y se muestra a continuaci\u00f3n.

Tabla 5.- Dosis Anual de Radiaci\u00f3n Ionizante Externa Natural.

<b>Dosis anual de Radiaci\u00f3n ionizante natural externa</b>	<b>mSv</b>	<b>%</b>
C\u00f3smica ionizante	0.28	36.4
Radionucleidos c\u00f3smicos	0.01	1.3
Terrestre	0.48	62.3
<b>Total</b>	<b>0.77</b>	<b>100.00</b>

La tasa de la dosis total de RIA calculada a la cual se est\u00e1 expuesto en las instalaciones de Nuclear Control es,

$$D_{\text{TotalLab}} = 0,256 \cdot \left( \frac{100}{36,4} \right)$$

Es decir, que en un a\u00f1o de exposici\u00f3n la dosis absorbida corresponde a,

$$D_{\text{TotalLab}} = 0,70 \frac{mSv}{a\u00f1o}$$

### 10.1.3. Comparaci\u00f3n

Considerando el resultado obtenido experimentalmente, en la subsecci\u00f3n 10.1.1, y el obtenido mediante la estimaci\u00f3n te\u00f3rica, en la subsecci\u00f3n 10.1.2, vemos que estos presentan una diferencia relativa porcentual de un 5.7 %. Este primer resultado representa un acuerdo moderado entre la cantidad detectada experimentalmente y la estimaci\u00f3n te\u00f3rica, lo cual da una primera impresi\u00f3n positiva acerca del uso de los dos\u00edmetros OSL

para la determinación de la dosis de RIA. Se debe considerar que los detectores son de tipo pasivo y recolectan la información con una escala de precisión de mSv por lo cual su comparación con datos teóricos, obtenidos mediante investigaciones que utilizaron instrumental de tipo instantáneo como cámaras de Ionización graduada, en nSv, puede producir diferencias más significativas en menores escalas de tiempo como días. Esto se discutió en término de los puntos que salen de la tendencia general que presentan los promedios de dosis de RIA acumulada, lo cual podría afectar la subestimación del valor de la dosis RIA obtenido mediante la interpolación hecha con la curva de regresión obtenida en la sección 10.1.1.

Ahora, los resultados se sometieron al criterio de validación dado en la ecuación (6) aplicable al ámbito de la dosimetría personal. El resultado de dicha comparación se muestra en la Tabla 5.

Tabla 6.- Aplicación de estándar ISO 14146:2002 para comparación de dosis anual teórica y estimada.

Hr teórica	Li	Hm/Hr	Ls	Hm estimación
0,70	0,65	0,94	1,52	0,66

Si bien el primer resultado mostró un acuerdo moderado entre la dosis obtenida experimentalmente y la teórica, este resultado provee de absoluta confianza para llevar a cabo este tipo de estudios utilizando dosímetros OSL como detectores de RIA, ya que el resultado se encuentra muy bien posicionado entre los límites dictados por el criterio de aceptación. Podemos ver que el resultado del cociente está muy cercano al promedio de los límites inferior y superior del criterio (1,09) y al valor 1. Sin embargo, muestra una leve tendencia hacia la zona del límite inferior, es decir el valor de referencia presenta una sobreestimación respecto al valor real, el experimental. Debido a que esta leve desviación del cociente, 0,06, del valor esperado, 1, es insignificante frente al rango de aprobación del criterio, 0,87, este resultado valida por completo el uso de los dosímetros OSL para la determinación de la dosis de RIA a la cual se está expuesto.

## 10.2. Medición de la dosis de RIA utilizando dosímetros OSL

### 10.2.1. Medición de la dosis de RIA en la Región Metropolitana.

En la Tabla 6, se muestra la dosis acumulada por los dosímetros OSL In light durante los 95 días de exposición en los lugares de campo, las cuales arrojaron un promedio de dosis de 0,19 mSv con una desviación estándar de 0,02. También se indica la ubicación geográfica y la altitud a la cual se encuentran los diferentes lugares de campo muestreados en la Región Metropolitana con el fin de etiquetar los lugares. Y en la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de las dosis de RIA extrapolada a 1 año de exposición utilizando el resultado de la regresión lineal presentada en la sección 10.1.1, la cual determina el

comportamiento de la dosis de RIA acumulada en el tiempo. En este caso la dosis promedio anual en la Región fue 0,66 mSv con una desviación estándar de 0,02.

Tabla 7.- Datos de campos de la dosis de radiación ionizante ambiental en la Región Metropolitana.

Ubicación		Altitud	Ubicación	Dosis a 95 días
Long	Lat	msnm	Comuna	mSv
-71,1929	-33,6758	167	MELIPILLA	0,20
-71,1292	-33,4014	200	CURACAVI	0,15
-70,8277	-33,5005	445	MAIPU	0,18
-70,7395	-33,7316	482	BUIN	0,15
-70,9295	-33,0862	573	TIL TIL	0,20
-70,5960	-33,4679	578	MACUL	0,18
-70,6326	-33,5706	622	LA PINTANA	0,18
-70,5021	-33,3859	908	LAS CONDES	0,20
-70,1986	-33,8726	1492	SAN JOSE	0,18
-70,3325	-33,3378	1744	LO BARNECHEA	0,23

Estos datos no muestran una dependencia de las dosis de la RIA con respecto a la altura del sitio analizado, como era esperado por lo predicho por el método de estimación teórica presentada en la ecuación (2). Podemos ver que a 167 m de altura sobre el nivel del mar existe la misma dosis que a los 908 msnm. Es más, el valor de dosis obtenido para el lugar de campo ubicado a menor altura presenta uno de los valores más altas de las dosis de RIA registradas en el conjunto de lugares. Esto puede ser entendido debido a la deficiencia en los puntos de medición, es decir, se puede deber a que sólo se realizó una medida por cada lugar de campo y como se puede observar en la tabla 13 de la sección 13.1 Anexo tablas, los valores de las dosis obtenidas con distintos detectores presentan fluctuaciones importantes. Es decir, que con más mediciones de campos en los mismos lugares se debería corroborar la predicción teórica, al menos en términos de la dependencia con la altura.

Tabla 8.- Datos de campos de la dosis de RIA en la Región Metropolitana obtenida mediante la extrapolación a 1 año de los datos de la tabla 6.

Ubicación		Altitud	Ubicación	Dosis a 1 año
Long	Lat	msnm	Comuna	mSv
-71,1929	-33,6758	167	MELIPILLA	0,67
-71,1292	-33,4014	200	CURACAVI	0,62
-70,8277	-33,5005	445	MAIPU	0,65
-70,7395	-33,7316	482	BUIN	0,62
-70,9295	-33,0862	573	TIL TIL	0,67
-70,5960	-33,4679	578	MACUL	0,65
-70,6326	-33,5706	622	LA PINTANA	0,65
-70,5021	-33,3859	908	LAS CONDES	0,67
-70,1986	-33,8726	1492	SAN JOSE	0,65
-70,3325	-33,3378	1744	LO BARNECHEA	0,70

Al igual que los datos presentados en la Tabla 6, los valores de la dosis de RIA obtenidos mediante la interpolación no presentan un aumento sistemático a medida que aumenta la altura del sitio muestreado.

### 10.2.2. Calculo teórico de la dosis de RIA en los lugares de campo.

Considerando que en la Región Metropolitana se determinó una tasa de la componente cósmica de la Dosis de RIA a nivel del mar de:

$$D_0 = 32 \text{ nSv/h.}$$

Y, utilizando la información de la altitud de los puntos de muestreo informadas en la Tabla 3, se procedió a calcular la tasa de la componente cósmica de la dosis de RIA en nSv/h a la cual se está expuesto en los distintos lugares de estudio, lo cual se presentan en la tabla 8.

Tabla 9.- Componente cósmica de la tasa de dosis de RIA en los lugares de campo bajo estudio.

Comuna	Kmsnm	Rad Cosmica nSv/hr
MELIPILLA	0,17	32,37
CURACAVI	0,20	32,51
MAIPU	0,45	34,15
BUIN	0,48	34,48
TIL TIL	0,57	35,38
MACUL	0,58	35,43
LA PINTANA	0,62	35,91
LAS CONDES	0,91	39,64
SAN JOSE	1,49	50,25
LO BARNECHEA	1,74	56,06

Utilizando esta información y la ecuación 8 que relaciona la componente cósmica de la RIA con la dosis de RIA total, a saber,

$$D_{Total} = D_{C\acute{o}smica} \cdot \left( \frac{100}{\% \_ aporte \_ C\acute{o}smico} \right) \quad (8)$$

Se procedió a calcular la tasa de dosis RIA total a la que se esta expuesto en los distintos lugares de campo. Dichos resultados son presentados, en la Tabla 9.

Tabla 10.- Calculo de la tasa de dosis de RIA a la cual se está expuesto en los lugares de campo de la Región Metropolitana

Ubicación		Altitud	Ubicación	Tasa de Dosis RIA
Long	Lat	msnm	Comuna	nSv/hr
-71,1929	-33,6758	167	MELIPILLA	74,70
-71,1292	-33,4014	200	CURACAVI	75,02
-70,8277	-33,5005	445	MAIPU	78,81
-70,7395	-33,7316	482	BUIN	79,57
-70,9295	-33,0862	573	TIL TIL	81,65
-70,5960	-33,4679	578	MACUL	81,77
-70,6326	-33,5706	622	LA PINTANA	82,88
-70,5021	-33,3859	908	LAS CONDES	91,48
-70,1986	-33,8726	1492	SAN JOSE	115,97
-70,3325	-33,3378	1744	LO BARNECHEA	129,38

Con los resultados presentados en la Tabla 9 se estimaron las dosis de RIA absorbida durante un periodo de 95 días y un año de exposición. Los resultados obtenidos de este cálculo son presentados en la Tabla 10.

Tabla 11.- Cálculo de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en los lugares de campo de la Región Metropolitana a 95 días y un año de exposición.

Ubicación		Altitud	Ubicación	Dosis a 95 días	Dosis a 1 año
Long	Lat	msnm	Comuna	mSv	mSv
-71,1929	-33,6758	167	MELIPILLA	0,17	0,65
-71,1292	-33,4014	200	CURACAVI	0,17	0,66
-70,8277	-33,5005	445	MAIPU	0,18	0,69
-70,7395	-33,7316	482	BUIN	0,18	0,70
-70,9295	-33,0862	573	TIL TIL	0,19	0,72
-70,5960	-33,4679	578	MACUL	0,19	0,72
-70,6326	-33,5706	622	LA PINTANA	0,19	0,73
-70,5021	-33,3859	908	LAS CONDES	0,21	0,80
-70,1986	-33,8726	1492	SAN JOSE	0,26	1,02
-70,3325	-33,3378	1744	LO BARNECHEA	0,29	1,13

El cálculo de la dosis de RIA absorbida tras 95 días de exposición es utilizada para comparar directamente con los datos experimentales, mientras que la dosis de RIA absorbida durante un año se utilizó para someter a prueba la recta obtenida por regresión como estimador de la dosis de RIA absorbida a largo plazo.

### 10.2.3. Comparación

Las Tablas 11 y 12 presentan la comparación de los resultados experimentales con los teóricos obtenidos para la dosis de RIA a la cual se está expuesto en los distintos lugares de campo a 95 días y un año respectivamente. Los resultados a 95 días de exposición corresponden a los provenientes directamente de la medición, mientras que la dosis de RIA a 1 año de exposición ha sido estimada considerando el resultado de la regresión realizada a las dosis medida por los dosímetros de control como un estimador. Para efectos de la comparación se utilizó el mismo criterio utilizado para la validación del método.

Tabla 12.- Aplicación del estándar ISO 14146:2002 para la comparación de la dosis de RIA de los lugares de campo a 95 días de exposición.

<b>Kmsnm</b>	<b>Teórica 95días</b>	<b>liminf</b>	<b>Cam /Teo</b>	<b>limsup</b>	<b>Campo 95días</b>	<b>comuna</b>
0,17	0,17	0,65	1,17	1,51	0,20	MELIPILLA
0,20	0,17	0,65	0,88	1,52	0,15	CURACAVI
0,45	0,18	0,65	1,00	1,52	0,18	MAIPU
0,48	0,18	0,65	0,83	1,52	0,15	BUIN
0,57	0,19	0,65	1,07	1,51	0,20	TIL TIL
0,58	0,19	0,65	0,97	1,52	0,18	MACUL
0,62	0,19	0,66	0,95	1,53	0,18	LA PINTANA
0,91	0,21	0,65	0,96	1,52	0,20	LAS CONDES
1,49	0,26	0,65	0,68	1,52	0,18	SAN JOSE
1,74	0,29	0,65	0,78	1,52	0,23	LO BARNECHEA

Se puede observar inmediatamente que todos los resultados están dentro del rango de aceptación impuesto por el criterio del estándar ISO 14146. Gran parte de los resultados presentan valores cercanos a 1 y sólo dos de estos presentan valores mayores a 1 (TIL-TIL y MELIPILLA), es decir que sólo en dos casos se obtuvo un valor experimental mayor al esperado. Sólo 1 dato está muy por debajo del valor 1 (SAN JOSÉ) y muy cercano al límite inferior, mostrando un muy mal acuerdo con el valor esperado, pero aun así está dentro del rango de aceptación.

Ahora, al analizar el conjunto de resultados como un todo, se puede apreciar que no existe una un patrón claro en los resultados, por ejemplo que las diferencias entre los valores experimentales y teóricos vayan aumentando o disminuyendo con la altura. Más bien se observa un comportamiento aleatorio de los resultados obtenidos, tal como se discutió en la Tabla 7, en la cual se presentaron los resultados de la medición realizada con los dosímetros. El resultado anterior se puede asociar al insuficiente número de datos de campo, bien en cada punto de muestreo como en cuanto a la distribución altitudinal de la región, lo cual debe ser mejorado con el fin de obtener mejores resultados con los dosímetros. Un ejemplo de cómo mejorar los resultados al realizar varias medidas, se puede ver en el tratamiento que se le hizo a los datos obtenidos con los dosímetros de control.



En la Figura 7 podemos ver que la dispersión de datos es bastante alta, lo cual lo podemos cuantificar al realizar una regresión lineal a dichos datos donde se obtuvo un valor del coeficiente de determinación de 0,978, mientras que al promediar los valores la correlación mejora bastante, pasando a un 0,993.

Otra característica importante del conjunto de resultados, es que en promedio los valores experimentales son menores a los valores de referencia calculados con la predicción teórica, es decir, tenemos una sobreestimación del valor real cuando se realizan el cálculo con la estimación teórica. Esta sobreestimación puede ser asociada al supuesto que las contribuciones a la dosis de RIA son constantes en proporción, lo cual indicaría que para alturas mayores donde la componente cósmica de la RIA es mayor, también lo es la componente terrestre, lo cual no tiene asidero. Por este motivo podemos afirmar que la sobreestimación en realidad se está produciendo en la estimación de la contribución terrestre de la RIA. Esto se puede afirmar debido a que precisamente los resultados a mayores alturas son los que se encuentran con valores más cercanos al límite inferior.

Para poder tener unos datos comparable con la literatura se presentan la comparación de los resultados obtenidos mediante el método de estimación de dosis a largo plazo desarrollado en este trabajo de tesis para un plazo de 12 meses y su contraste con el estimado teórico en la Tabla 12.

Tabla 13.- Aplicación del estándar ISO 14146:2002 para la comparación de la dosis de RIA estimada mediante interpolación de los lugares de campo a 1 año de exposición

	mSv/año				mSv/año	
Msnm	Teórica Anual	liminf	CamExtra/Teo	limsup	Campo Extrapolado	Comuna
167	0,65	0,65	1,03	1,51	0,67	MELIPILLA
200	0,66	0,65	0,95	1,52	0,62	CURACAVI
445	0,69	0,65	0,95	1,52	0,65	MAIPU
482	0,70	0,65	0,90	1,52	0,62	BUIN
573	0,72	0,65	0,94	1,51	0,67	TIL TIL
578	0,72	0,65	0,91	1,52	0,65	MACUL
622	0,73	0,66	0,90	1,53	0,65	LA PINTANA
908	0,80	0,65	0,84	1,52	0,67	LAS CONDES
1492	1,02	0,65	<b>0,64</b>	1,52	0,65	SAN JOSE
1744	1,13	0,65	<b>0,62</b>	1,52	0,70	LO BARNECHEA

En esta ocasión se puede observar que no todos los resultados están dentro del rango de aceptación impuesto por el estándar ISO 14.146 quedando excluidos SAN JOSE y LO BARNECHEA. En casi todos los casos se obtuvo un valor experimental menor al esperado, coincidiendo con el comportamiento que se observó en los resultados de la Tabla 11. Sólo un resultado en MELIPILLA es mayor al esperado.

Los resultados obtenidos para los sitios de mayor altura, 1492 y 1744 msnm, resaltado en la tabla, están por debajo del límite inferior. Mostrando un descuerdo con el valor esperado y la desaprobación por parte del criterio de comparación para estos resultados de los sitios con mayor altura. Tras estos resultados hay dos posibles casos: el primero es que la predicción teórica está sobreestimando los valores de dosis de RIA y segundo que la estimación que se está haciendo a partir de la regresión lineal, el método de estimación a largo plazo presentado en esta tabla, este subestimando dicha cantidad. Si bien, ya se discutió de la posible sobreestimación de la dosis de RIA calculada mediante la expresión teórica a la luz de los datos experimentales presentados en la Tabla 11, podemos ver que los resultados de la Tabla 12, en general, presentan un peor acuerdo que los resultados experimentales de la Tabla 11, por lo cual podemos afirmar que la utilización del método de estimación a largo plazo utilizando los dosímetros de control es un mal estimador en caso de campo abierto, ya que para estos casos se está subestimando los valores reales de exposición. Esto último se puede entender, ya que al utilizar la recta obtenida mediante la regresión realizada a los datos obtenidos con los dosímetros de control se está asumiendo que la tasa de dosis de RIA en el laboratorio de Nuclear Control es la misma que en los lugares de campo, lo cual no es cierto, y puede conducir a una sobreestimación o a una subestimación de la dosis de RIA real. Además, debemos considerar que la recta de regresión se confeccionó con datos Indoor, que si bien pueden tener una pendiente similar a una recta Outdoor la base puede variar.

### **10.3. Elaboración de mapas de distribución de dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana.**

Como una forma de facilitar la interpretación de los mapas de esta sección, se incluyen copia a pagina completa de todos estos en la sección 13.2 Anexo Mapas.

#### **10.3.1. Mapa de distribución de la dosis de RIA Teórica a cual se está expuesto en la región metropolitana según datos UNSCEAR**

De la aplicación de la metodología resumida en la Figura 10 que considera, la estimación de la radiación cósmica mediante el uso del modelo de elevación de la región metropolitana y la aplicación de la ecuación 2, a la vez que fueron usados los porcentajes definidos por el UNSCEAR como aportes de la fuentes naturales de radiación ionizante ambiental. Fue posible generar los modelos de distribución de dosis de RIA teóricas para la Región tanto para 95 días de exposición como para la determinación de la dosis anual de RIA, lo cual se muestra en la figuras 15 y 16 respectivamente.

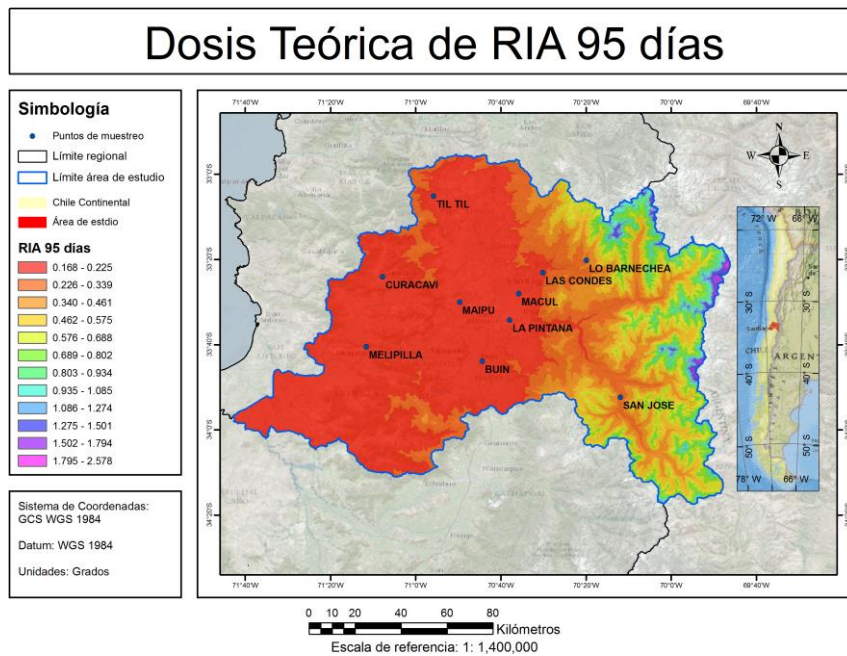


Figura 14: Modelo distribución de dosis Teórica de exposición RIA en 95 días Región Metropolitana.

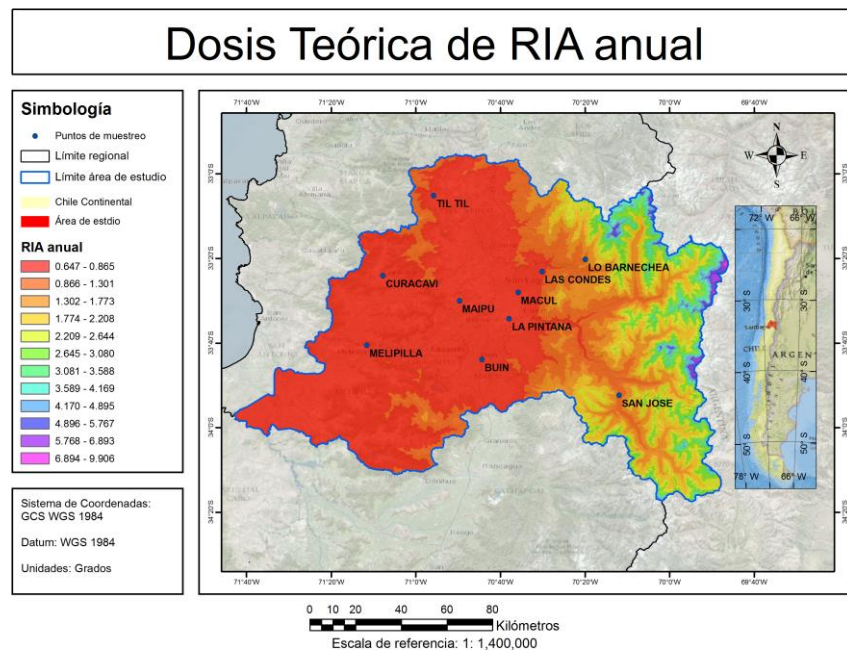


Figura 15: Modelo distribución de dosis Teórica de exposición RIA Anual Región Metropolitana.

### 10.3.2. Mapa de distribución de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana por interpolación de datos campo.

En esta sección se procedió a realizar una interpolación del tipo Kriging de los resultados experimentales utilizando el software Surfer, para generar un mapa de dosis de RIA a la cual se está expuesto la región Metropolitana durante 95 días (Figura 16).

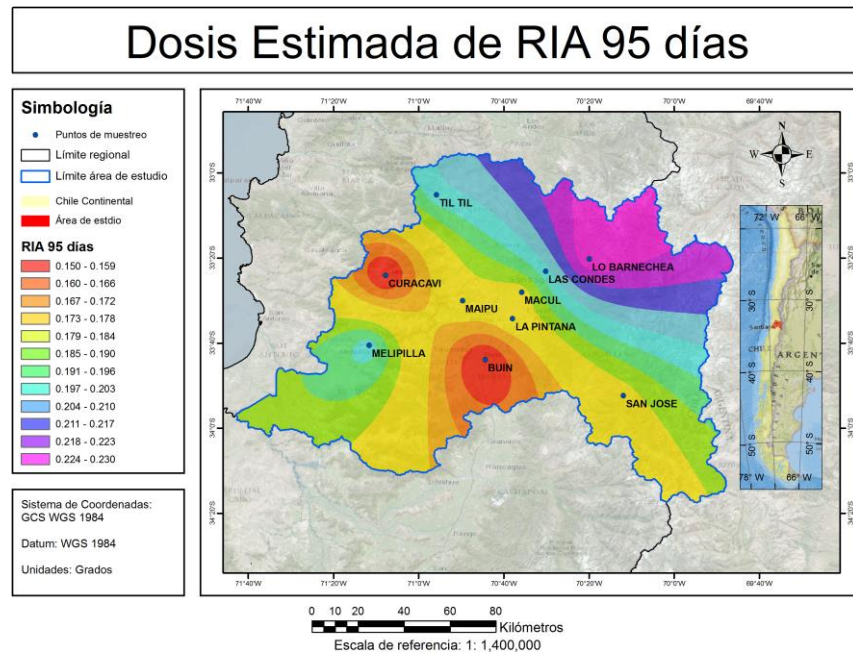


Figura 16: Modelo interpolado de distribución de dosis de exposición RIA en 95 días Región Metropolitana.

Al analizar la imagen generada mediante la interpolación y debido al buen acuerdo existente entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante el cálculo teórico, se puede aceptar como válida esta distribución de dosis para la RIA en la Región Metropolitana para el periodo de 95 días en que se expusieron los dosímetros. Eso sí para generalizar esta imagen como la distribución de dosis de RIA se debe contar con un periodo de un año de mediciones. Lo anterior se presenta en la Figura 17, en el mapa de dosis de RIA a un año de exposición obtenido mediante el cálculo teórico utilizando la expresión empírica presentada en la Ecuación (2) y la consideración que los aportes porcentuales de las diversas fuentes son constantes.

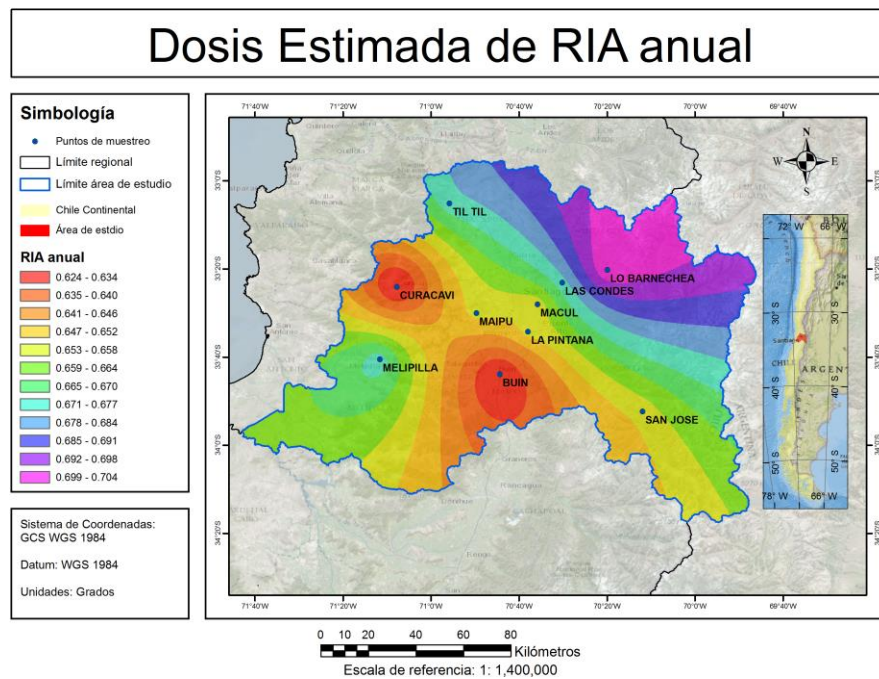


Figura 17: Modelo interpolado de distribución de dosis de exposición RIA en Anual Región Metropolitana.

Si bien este mapa puede servir para conocer la dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana, este sólo puede ser usado como referencia, ya que como se discutió en el punto 10.2.3 en la extrapolación de datos se evidenció un mal acuerdo para sitios ubicados en altitudes sobre 1490 msnm, además que la ubicación de los puntos de control y su limitado número para cubrir de forma adecuada la región podría distorsionar la estimación realizada.

### 10.3.3. Mapa compensado de la dosis de RIA a la cual se está expuesto en la región metropolitana

Como una manera de obtener una distribución de las dosis más acorde a la geomorfología del área de estudio se generó nueva cartografía, la cual se logró al combinar el modelo de distribución teórica de dosis de RIA con el modelo de estimación obtenido al interpolar los datos de campo. La combinación se llevó a cabo promediando la información de ambas fuentes por medio de un software de análisis espacial lo cual se muestra en la Figura 18 para la dosis correspondiente a 95 días y en la Figura 19 posterior la dosis anual.

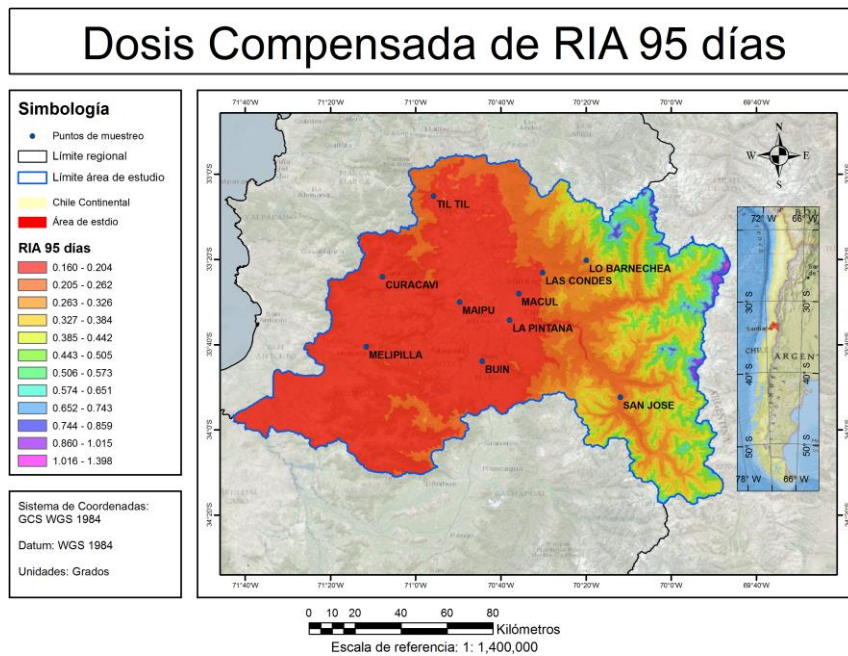


Figura 18: Modelo Compensado de distribución de dosis de exposición RIA en 95 días Región Metropolitana

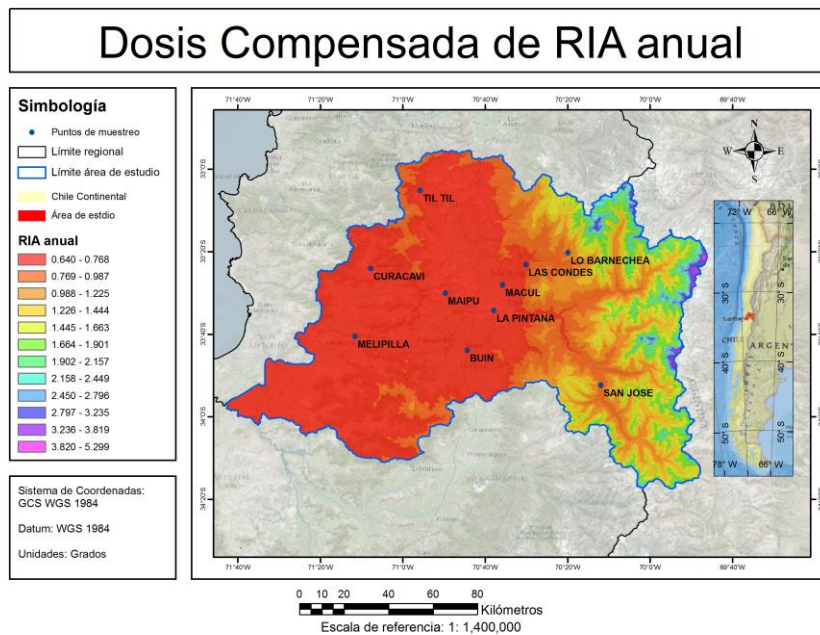


Figura 19: Modelo Compensado de distribución de dosis de RIA Anual Región Metropolitana.

#### **10.3.4. Comparación**

Con el fin de realizar la comparación de los resultados obtenidos al generar los mapas, se extrajo de cada modelo de distribución, la dosis definida en los 10 puntos de muestreo y se aplicó el estándar de comparación. Considerando en el caso de los modelos de 95 días como dosis de referencia (Hr) la obtenida de los dosímetros de campo de la tabla 6 de la subsección 10.2.1 y para los modelos de distribución de dosis anual, la dosis referencia fue la dosis extrapolada de la tabla 7 de la subsección 10.2.1.

Los resultados de la aplicación del estándar se muestran en la tablas 15 y 16 de la sección 13.1. Anexo tablas, para los modelos de 95 días de exposición y 17 a 18 para los modelos de exposición anual.

De la aplicación del estándar para evaluar los modelos de dosis por 95 días de exposición fue posible confirmar que la modelación según los parámetros definidos como teóricos sirve como un estimador aceptable al no existir ningún punto que esté fuera de los límites de aceptación, sin embargo la variación promedio entre los 10 puntos muestrales fue del 14,5% de lo detectado en el campo, principalmente afectado por la variación a mayor altitud. A la vez que al evaluar el modelo compensado de dosis el grado de aceptación es aún mejor ya que la variación promedio entre las lecturas y el dato del modelo es solo del 7%.

En cuanto a aplicación del estándar para evaluar los modelos de dosis anual de exposición fue posible descartar que la modelación según los parámetros definidos como teóricos sirve como estimador ya que dos puntos quedaron fuera de los límites de aceptación, con una variación promedio entre los 10 puntos muestrales del 19,3% de lo detectado en el campo. En cuanto que al evaluar el modelo compensado, todos los puntos estuvieron dentro de los límites de aceptación con una variación promedio entre las lecturas y el dato del modelo de 9,8% por lo cual el modelo compensado puede ser considerado un buen estimador de la dosis real en la Región Metropolitana.

#### **10.4. Recomendaciones a trabajos futuros**

Este trabajo es un primer paso dentro de esta área de investigación, la cual se debe seguir explorando con el fin de ser un aporte mayor a la protección radiológica, aportando un elemento a considerar en la gestión del riesgo e interpretación de los resultados dosimétricos de los trabajadores expuestos a radiación. Por lo cual es recomendable que cualquier investigación posterior que desee tomar como punto de inicio o referencia lo realizado en este estudio, considere algunas de las limitaciones metodológicas detectadas durante su elaboración.

Primero mejorar el muestreo en terreno, aumentando la cantidad de puntos de muestreo y su distribución, ya que la limitante de tiempo y recursos forzó el uso de sólo 10 puntos en este trabajo lo cual no favorece la exactitud del modelo de interpolación de un área de la

extensión y variabilidad geomorfológica de la Región Metropolitana. También se puede considerar aumentar el tiempo de detección en terreno para evitar la extrapolación de datos, pero ambas situaciones implicarían costos mayores a la hora de diseñar los estudios.

En segundo termino se recomienda explorar una nueva toma de datos para la elaboración de la recta de dosis en función del tiempo, ya que sería recomendable el uso de dosímetros que estuviesen 100 % “Outdoor” que no se vean afectados por blindajes si se desea elaborar una recta de dosis RIA a ser usada para estimar dosis a campo abierto. Otra limitante de este tipo es la incorporación de elementos detectores que registren dosis proveniente Ionización por Neutrones o Radioisótopo ingeribles, lo cual aumentaría considerablemente los costos y complicaría el diseño del estudio. Con esto, el trabajo realizado es presentado como un aporte al estudio de la radiación ionizante en Chile y como elemento de análisis a considerar en el monitoreo de dosis de las personas ocupacionalmente expuestas a radiación.



## 11. CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido sistematizar una metodología para obtener una aproximación de la dosis de RIA esperada para toda la Región Metropolitana, estimación que puede ser replicada en el resto del país, sabiendo que se obtendrá un resultado consistente con la realidad, siempre y cuando se realicen los ajustes metodológicos necesarios para una estimación a mayor escala. Su utilidad queda corroborada por los resultados presentados en el capítulo 10, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Se ha logrado dar respuesta a la interrogante respecto al comportamiento de la RIA de fondo en la Región Metropolitana, constatando una tasa de aumento mensual de 0,0535 mSv llegando a 0,66 mSv en 12 meses, y que existe variabilidad en los diversos puntos según las distintas ubicaciones geográficas y su altitud, ya que se registró un desviación estándar de 0,02 entre el conjunto muestral, siendo que el límite inferior de detección de dosis de los dosímetros es 0,01 mSv.
- La elaboración de un modelo de distribución de dosis para la Región Metropolitana, permitió detectar una diferencia de 0,03 mSv entre los extremos de altitud de los puntos de muestreo (167 y 1744 msnm), mientras que por ubicación dentro la región, se encontró una variación de 0,05 mSv entre el norte y el sur.
- La modelación digital de las dosis compensada, ha demostrado ser un estimador de alta confiabilidad teórica al permitir estimar dosis de RIA que se ajustan completamente al estándar de intercomparación ISO14146:2002, lo cual permite conocer la dosis de RIA en toda la Región Metropolitana de Santiago.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia para sustancias Tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR), 1999, [On-line], Resumen de Salud Pública, Reseña Toxológica para la Radiación Ionizante, Disponible en el WWW: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs149.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs149.html), Citado: 4 de Agosto de 2015.
2. Aguerre, L,O,; Carelli, J,L, y Gregori, B,N, Sistema de monitoreo ambiental con TLD, Primer Congreso Americano del IRPA (International Radiation Protection Association), Acapulco, México, 4-8 setiembre 2006, Disponible en el WWW: <http://www.foroiberam.org/documents/193375/199920/Sistema+de+monitoreo+ambiental+con+TLD/5bed6bf8-80c2-4bbe-9149-1cfbab577c16;jsessionid=6B8D3BA55C86982FC52C22AE2E732288?version=1,0>
3. Akselrod, M,S y Mckeever, S, W, S, A. Radiation dosimetry method using pulsed optically stimulated luminescence, Radiat, Prot, Dosim, 81, N°,3, 167-176 (1999).
4. Cascon, M, Riesgos asociados con las radiaciones ionizantes, **Revista argentina de cardiología**, v.77 n.2, mar/abr 2009 *versión On-line* ISSN 1850-3748 Disponible en el WWW: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-37482009000200010](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-37482009000200010)
5. Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChen); (2015). Manual curso básico de protección radiológica operacional. CUBEPRO. Santiago; Chile.
6. EDUCAR CHILE, (2015). [On-line], Particular nucleares y reacciones nucleares, Disponible en el WWW: <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=136399> Citado: 8 de Octubre de 2015.
7. Ferrufino, Discacciatti y Lopez (2013). Resultados del noveno ejercicio de itercomparacion de servicios de dosimetría personal realizado en la republica argentina en el año 2011, Disponible en el WWW: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/44/117/4411> Citado:19 de Octubre de 2015.
8. Ford, R, M,, Hanify, R, D,, y Perks, C, A,(2004), Depletion of signal from optically stimulated luminescences doseimeters, In 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid 2004.Health Physics Society, Specialists in Radiation Safety (HPS), 2010, [On-line], Environmental Radiation, Disponible en el WWW:

[https://hps.org/documents/environmental\\_radiation\\_fact\\_sheet.pdf](https://hps.org/documents/environmental_radiation_fact_sheet.pdf), Citado: 10 de Agosto 2015.

9. Health Physic Society (HPS) (2010), Environmental Radiation Disponible en el WWW: [https://hps.org/documents/environmental\\_radiation\\_fact\\_sheet.pdf](https://hps.org/documents/environmental_radiation_fact_sheet.pdf) Citado: 18 de Octubre de 2015.
10. Instituto de Salud Pública (ISPCH), Ministerio de Salud Chile, 2015, [On-line], Vigilancia Radiológica Ocupacional, Disponible en el WWW: <http://www.ispch.cl/vigilancia-radiologica-ocupacional>, Citado: 13 de Agosto 2015.
11. Instituto Nacional de Investigación Nuclear (ININ), “Radiación Natural”, Contacto Nuclear año 2011 Vol 61 pag 16, Disponible en el WWW: <http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/CONTACTO%20NUCLEA R%2061%20Radiaci%C3%B3n%20natural.pdf>, Citado el 10 de Diciembre 2015.
12. ISO 14146:2002 Criteria and performance limits for the periodic evaluation of processors of personal dosimeters for X and gamma radiation. Disponible en el WWW: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14146:ed-1:v1:en>
13. Landauer, 2010, [On-line], OSL Technology, There is no clearer reflection of LANDAUER’s leadership role in providing state-of-the-art radiation safety solutions than our proprietary OSL dosimeter technology, Disponible en el WWW: [http://www.landauer.com/Healthcare\\_and\\_Education/Technology/OSL\\_Technology.aspx](http://www.landauer.com/Healthcare_and_Education/Technology/OSL_Technology.aspx), Citado: 18 de Agosto 2015.
14. Moeller DW, Sun LS, (2006) Comparison of Natural Background dose rates for residents of the Amargosa valley, NV, to those in leadville, CO, and the states of Colorado and Nevada, Health Phys, 2006 Oct;91(4):338-353. Disponible en el WWW: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/labs/articles/16966877/> Citado: 20 de Diciembre de 2015.
15. Morron, L, 2014 [On-line], Radiactivo Man en “¿Qué son la radiaciones ionizantes?” Disponible en el WWW: <https://losmundosdebrana.wordpress.com/2014/01/24/radiactivo-man-en-que-son-la-radiaciones-ionizantes/> Citado: 8 de Octubre de 2015.
16. Mora, P, 1999, [On-line], La Radiación en la vida cotidiana, Las radiaciones ionizantes: ¿Son naturales o artificiales? Revista acta Médica, 41, 2; 16-23, Disponible en el WWW: <https://tecdigital.tec.ac.cr/revista-fisica/Archivo/N7/Articulos/articulo1-7-p1.htm>, Citado: 21 de Agosto 2015.

17. National Council on Radiation Protection and Measurements, Exposure of the populations in the United States and Canada from natural background radiation, Bethesda, MD: NCRP Report No, 94; 1987b
18. Organización Mundial de la Salud (OMS), 2012, [On-line], Radiaciones Ionizantes: efectos en la Salud y medidas de Protección, Disponible en el WWW: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>, Citado: 25 de Agosto 2015.
19. Radiological Protection Institute of Ireland (RPII), 2014, [On-line], Radiation Doses Received by the Irish Population, Disponible en el WWW: [https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII Radiation Doses Irish Population 2014.pdf](https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_Radiation_Doses_Irish_Population_2014.pdf), Citado: 29 de Agosto 2015.
20. Reyes, C,M,A,(2010), [On-Line] Estimación paramétrica y no paramétrica de la tendencia en datos con dependencia espacial, un estudio de simulación, Disponible en WWW: [http://eio.ucs.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto\\_401.pdf](http://eio.ucs.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_401.pdf), Citado: 24 de Noviembre 2016.
21. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) 2003, Ionising radiation exposure in the Netherlands, H, Eleveld, RIVM Report 861020002/2003. Disponible en elWWW: <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/861020002.pdf> Citado: 12 de Octubre 2015
22. Stuardo, E. 1988, Natural radiation external exposures levels in Chilean Sub-Antarctic and country stations. Disponible en el WWW: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:20045304](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:20045304) Citado: 15 de Noviembre de 2015.
23. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2008, [On-line], Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Disponible en el WWW: [http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753\\_Report\\_2008\\_Annex\\_B.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf), Citado: 13 de Noviembre de 2015.
24. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, (UNSCEAR), 2000 Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly; Annex B, Exposures from natural radiation sources, New York, NY: United Nations; 2000. Disponible en el WWW: [http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Annex-B.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Annex-B.pdf) Citado: 03 Agosto de 2015.

### 13. ANEXOS

#### 13.1. Anexo tabla

Tabla 14.- Datos asociadas a las lecturas de dosis de RIA obtenidas con los 148 dosímetros de control ubicados en el laboratorio de nuclear control.

Case serial#	DDE(Mrem)	Periodo	Meses Expuestos	Días Expuestos	mSv (DDE)
XA01995022F	3	2015nov	0	0	0,03
XA016978501	3	2015nov	0	0	0,03
XA02222457G	3	2015nov	0	0	0,03
XA01727582D	13	2015oct	1	31	0,13
XA00640054S	11	2015oct	1	31	0,11
XA017367274	9	2015oct	1	31	0,09
XA01993936Q	9	2015oct	1	31	0,09
XA01698934S	10	2015oct	1	31	0,1
xa00033855f	15	2015sep	2	62	0,15
XA02355912A	14	2015sep	2	62	0,14
XA02222737C	12	2015sep	2	62	0,12
XA008305689	22	2015ago	3	93	0,22
XA01737571E	21	2015ago	3	93	0,21
XA016528380	17	2015ago	3	93	0,17
XA01993919M	22	2015jul	4	124	0,22
XA016981257	25	2015jul	4	124	0,25
XA02002654O	29	2015jul	4	124	0,29
XA016979111	30	2015jul	4	124	0,3
XA01698673W	21	2015jul	4	124	0,21

XA017367266	32	2015jun	5	154	0,32
XA01995053A	23	2015jun	5	154	0,23
XA01029721M	29	2015jun	5	154	0,29
XA01736229A	38	2015may	6	185	0,38
XA01674767V	40	2015may	6	185	0,4
XA01736225I	37	2015may	6	185	0,37
XA02206290U	31	2015abr	7	215	0,31
XA01740981A	35	2015abr	7	215	0,35
XA00274354G	42	2015abr	7	215	0,42
XA01673011R	49	2015abr	7	215	0,49
XA016995711	42	2015abr	7	215	0,42
XA02183492A	56	2015mar	8	246	0,56
XA02206546H	44	2015mar	8	246	0,44
XA025936128	59	2015mar	8	246	0,59
XA02593948N	54	2015feb	9	274	0,54
XA01653225I	43	2015feb	9	274	0,43
XA02593948N	57	2015feb	9	274	0,57
XA017367282	53	2015ene	10	305	0,53
XA01740357D	55	2015ene	10	305	0,55
XA01698329V	62	2015ene	10	305	0,62
XA02325077I	63	2015ene	10	305	0,63
XA00624710Q	64	2015ene	10	305	0,64
XA02222860L	61	2014dic	11	336	0,61
XA01736029E	68	2014dic	11	336	0,68
XA02274621F	57	2014dic	11	336	0,57

XA02222304T	67	2014nov	12	366	0,67
XA019950837	66	2014nov	12	366	0,66
XA02222128N	72	2014nov	12	366	0,72
XA01699087Y	60	2014oct	13	397	0,6
XA016982734	67	2014oct	13	397	0,67
XA01736025M	58	2014oct	13	397	0,58
XA01739987R	70	2014oct	13	397	0,7
XA01994653Z	62	2014oct	13	397	0,62
XA02274986T	88	2014sep	14	427	0,88
XA02183433E	87	2014sep	14	427	0,87
XA01736532H	84	2014sep	14	427	0,84
XA016986223	84	2014ago	15	458	0,84
XA01994718R	81	2014ago	15	458	0,81
XA01737420N	89	2014ago	15	458	0,89
XA01698041F	80	2014jul	16	489	0,8
XA00545177E	89	2014jul	16	489	0,89
xa00567112o	89	2014jul	16	489	0,89
XA00542043U	80	2014jul	16	489	0,8
XA01698111G	89	2014jul	16	489	0,89
XA019951918	91	2014jun	17	519	0,91
XA01994697N	75	2014jun	17	519	0,75
XA017369270	89	2014jun	17	519	0,89
XA02001406U	101	2014may	18	550	1,01
XA016813781	109	2014may	18	550	1,09
XA01674402H	99	2014may	18	550	0,99

XA01993584X	84	2014abr	19	580	0,84
XA01699839J	86	2014abr	19	580	0,86
XA016815167	90	2014abr	19	580	0,9
XA01994421A	97	2014abr	19	580	0,97
XA00701976A	93	2014abr	19	580	0,93
XA01737230Q	107	2014mar	20	611	1,07
XA00060640R	116	2014mar	20	611	1,16
XA016982148	102	2014feb	21	639	1,02
XA01681307A	108	2014feb	21	639	1,08
XA00606419G	119	2014feb	21	639	1,19
XA01994674V	114	2014ene	22	670	1,14
XA01698196Y	122	2014ene	22	670	1,22
XA017415958	113	2014ene	22	670	1,13
XA01698230E	106	2014ene	22	670	1,06
XA00839968S	99	2014ene	22	670	0,99
XA016996040	136	2013dic	23	701	1,36
XA016981249	114	2013dic	23	701	1,14
XA01673313H	133	2013dic	23	701	1,33
XA02001416T	116	2013nov	24	731	1,16
XA01681216D	136	2013nov	24	731	1,36
XA01697944S	129	2013nov	24	731	1,29
XA00930201Y	150	2013oct	25	762	1,5
XA00843115N	138	2013oct	25	762	1,38
XA01682022N	134	2013oct	25	762	1,34
XA01698955O	139	2013oct	25	762	1,39



XA01698510A	100	2013oct	25	762	1
XA01698961V	125	2013sep	26	792	1,25
XA019944632	150	2013sep	26	792	1,5
XA01994785Q	146	2013sep	26	792	1,46
XA016986108	141	2013ago	27	823	1,41
XA017368248	155	2013ago	27	823	1,55
XA01741550M	154	2013ago	27	823	1,54
XA01681050P	117	2013jul	28	854	1,17
XA017415776	155	2013jul	28	854	1,55
XA01736781A	121	2013jul	28	854	1,21
XA01699033B	148	2013jul	28	854	1,48
XA01681107E	144	2013jul	28	854	1,44
XA01698212C	146	2013jun	29	884	1,46
XA008010034	167	2013jun	29	884	1,67
XA01736968U	164	2013jun	29	884	1,64
XA01737172K	152	2013may	30	915	1,52
XA01735928Z	163	2013may	30	915	1,63
xa00210529I	181	2013may	30	915	1,81
XA019950754	143	2013abr	31	945	1,43
XA01741833C	164	2013abr	31	945	1,64
XA016809623	132	2013abr	31	945	1,32
XA00360397B	164	2013abr	31	945	1,64
XA01993547V	154	2013abr	31	945	1,54
XA02276071K	174	2013mar	32	976	1,74
XA02222220I	159	2013mar	32	976	1,59

XA01681629Y	178	2013mar	32	976	1,78
XA00588745Y	195	2013feb	33	1004	1,95
XA01697981U	189	2013feb	33	1004	1,89
XA01698967J	172	2013feb	33	1004	1,72
XA01736431L	190	2013ene	34	1035	1,9
XA01741035O	168	2013ene	34	1035	1,68
XA019935524	188	2013ene	34	1035	1,88
XA01681112N	162	2013ene	34	1035	1,62
XA016824572	157	2013ene	34	1035	1,57
XA01740898X	195	2012dic	35	1066	1,95
XA01697858L	171	2012dic	35	1066	1,71
XA016808435	201	2012dic	35	1066	2,01
XA022746752	167	2012nov	36	1096	1,67
XA01741574C	196	2012nov	36	1096	1,96
XA01698921Z	209	2012nov	36	1096	2,09
XA00169373E	186	2012oct	37	1127	1,86
XA016986140	203	2012oct	37	1127	2,03
XA016990828	204	2012oct	37	1127	2,04
XA01737123N	193	2012oct	37	1127	1,93
XA016978600	209	2012oct	37	1127	2,09
XA01994792V	218	2012sep	38	1157	2,18
XA01736281K	198	2012sep	38	1157	1,98
XA01698549P	202	2012sep	38	1157	2,02
XA003676449	215	2012ago	39	1188	2,15
XA01699495T	220	2012ago	39	1188	2,2

XA01697904W	210	2012ago	39	1188	2,1
XA01740095J	198	2012jul	40	1219	1,98
XA00352617D	212	2012jul	40	1219	2,12
XA01736285C	179	2012jul	40	1219	1,79
XA00936361K	215	2012jul	40	1219	2,15
XA020014014	213	2012jul	40	1219	2,13
XA019816039	225	2012jun	41	1249	2,25
XA016744746	239	2012jun	41	1249	2,39
XA01737670E	234	2012jun	41	1249	2,34
XA021421010	227	2012jun	41	1249	2,27
XA016981934	210	2012jun	41	1249	2,1
XA02276051M	235	2012may	42	1280	2,35
XA02276050O	232	2012may	42	1280	2,32
XA02223280U	237	2012may	42	1280	2,37
XA02276127B	234	2012abr	43	1310	2,34
XA022757329	230	2012abr	43	1310	2,3
XA02276135E	236	2012abr	43	1310	2,36
XA005982472	222	2012abr	43	1310	2,22
XA02276121N	236	2012abr	43	1310	2,36
XA016729128	217	2012mar	44	1341	2,17
XA006020415	255	2012mar	44	1341	2,55
XA01698277W	243	2012mar	44	1341	2,43
XA01956775X	263	2012mar	44	1341	2,63
XA016981356	228	2012mar	44	1341	2,28
XA01697991T	256	2012feb	45	1370	2,56

XA01673604A	267	2012feb	45	1370	2,67
XA01674009B	253	2012feb	45	1370	2,53
XA01681458I	220	2012feb	45	1370	2,2
XA01682622B	246	2012feb	45	1370	2,46
XA01736479I	246	2012ene	46	1401	2,46
XA00249913B	266	2012ene	46	1401	2,66
XA01699496R	256	2012ene	46	1401	2,56
XA01740463I	232	2012ene	46	1401	2,32
XA00209646G	242	2012ene	46	1401	2,42
XA01956600G	282	2011dic	47	1432	2,82
XA019566048	245	2011dic	47	1432	2,45
XA01956597V	268	2011dic	47	1432	2,68
XA01956458Z	271	2011nov	48	1462	2,71
XA01956738V	244	2011nov	48	1462	2,44
XA01957189Z	276	2011nov	48	1462	2,76

Tabla 15.- Datos asociadas a los promedios por periodos de exposición de las lecturas de dosis de RIA obtenidas con los 148 dosímetros de control ubicados en el laboratorio de nuclear control.

<b>Meses Expuestos</b>	<b>Periodo</b>	<b>Días Expuestos</b>	<b>Msv (Prom)</b>
0	2015nov	0	0,03
1	2015oct	31	0,10
2	2015sep	62	0,14
3	2015ago	93	0,20
4	2015jul	124	0,25
5	2015jun	154	0,28
6	2015may	185	0,38
7	2015abr	215	0,40
8	2015mar	246	0,53
9	2015feb	274	0,51
10	2015ene	305	0,59
11	2014dic	336	0,62
12	2014nov	366	0,68
13	2014oct	397	0,63
14	2014sep	427	0,86
15	2014ago	458	0,85
16	2014jul	489	0,85
17	2014jun	519	0,85
18	2014may	550	1,03
19	2014abr	580	0,90
20	2014mar	611	1,12
21	2014feb	639	1,10
22	2014ene	670	1,11

23	2013dic	701	1,28
24	2013nov	731	1,27
25	2013oct	762	1,32
26	2013sep	792	1,40
27	2013ago	823	1,50
28	2013jul	854	1,37
29	2013jun	884	1,59
30	2013may	915	1,65
31	2013abr	945	1,51
32	2013mar	976	1,70
33	2013feb	1004	1,85
34	2013ene	1035	1,73
35	2012dic	1066	1,89
36	2012nov	1096	1,91
37	2012oct	1127	1,99
38	2012sep	1157	2,06
39	2012ago	1188	2,15
40	2012jul	1219	2,03
41	2012jun	1249	2,27
42	2012may	1280	2,35
43	2012abr	1310	2,32
44	2012mar	1341	2,41
45	2012feb	1370	2,48
46	2012ene	1401	2,48
47	2011dic	1432	2,65

48	2011nov	1462	2,64
----	---------	------	------

Tabla 16.- Comparación mapa mediante estándar de dosis teórica y de campo en 95 días.

Kmsnm	campo mSv 95días	liminf	ModeloT/Campo 95	limsup	Modelo teo	comuna
167	0,2	0,65	0,85	1,51	0,17	MELIPILLA
200	0,15	0,65	1,14	1,52	0,17	CURACAVI
445	0,18	0,65	1	1,52	0,18	MAIPU
482	0,15	0,65	1,21	1,52	0,18	BUIN
573	0,2	0,65	0,93	1,51	0,19	TIL TIL
578	0,18	0,65	1,04	1,52	0,19	MACUL
622	0,18	0,66	1,05	1,53	0,19	LA PINTANA
908	0,2	0,65	1,04	1,52	0,21	LAS CONDES
1492	0,18	0,65	1,47	1,52	0,26	SAN JOSE
1744	0,23	0,65	1,28	1,52	0,29	LO BARNECHEA

Tabla 17.- Comparación mapa mediante estándar de dosis compensada y de campo en 95 días.

Kmsnm	campo mSv 95días	liminf	ModeloC/Campo 95	limsup	Modelo comp	comuna
167	0,2	0,65	0,93	1,51	0,19	MELIPILLA
200	0,15	0,65	1,07	1,52	0,16	CURACAVI
445	0,18	0,65	1	1,52	0,18	MAIPU
482	0,15	0,65	1,1	1,52	0,17	BUIN
573	0,2	0,65	0,97	1,51	0,19	TIL TIL
578	0,18	0,65	1,02	1,52	0,18	MACUL
622	0,18	0,66	1,02	1,53	0,18	LA PINTANA
908	0,2	0,65	1,02	1,52	0,2	LAS CONDES
1492	0,18	0,65	1,23	1,52	0,22	SAN JOSE
1744	0,23	0,65	1,14	1,52	0,26	LO BARNECHEA



Tabla 18.- Comparación mediante estándar de dosis teórica y de campo Anual.

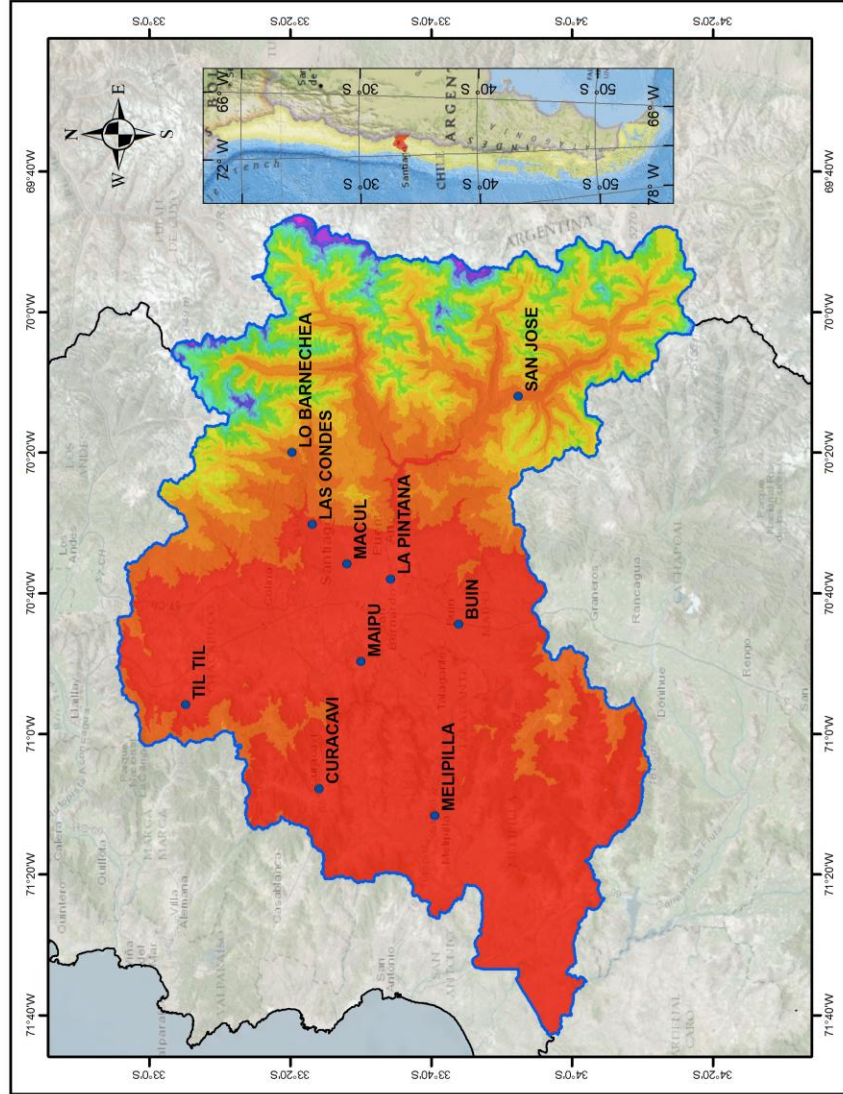
Kmsnm	Extrapolación Campo Anual	Liminf	ModeloT/ExAnual	Limsup	Modelo teo	comuna
167	0,67	0,65	0,98	1,51	0,65	MELIPILLA
200	0,62	0,65	1,06	1,52	0,66	CURACAVI
445	0,65	0,65	1,06	1,52	0,69	MAIPU
482	0,62	0,65	1,12	1,52	0,7	BUIN
573	0,67	0,65	1,07	1,51	0,72	TIL TIL
578	0,65	0,65	1,1	1,52	0,72	MACUL
622	0,65	0,66	1,12	1,53	0,73	LA PINTANA
908	0,67	0,65	1,2	1,52	0,8	LAS CONDES
1492	0,65	0,65	1,56	1,52	1,02	SAN JOSE
1744	0,7	0,65	1,62	1,52	1,13	LO BARNECHEA

Tabla 19.- Comparación mediante estándar de dosis compensada y de campo Anual.

Kmsnm	Extrapolación Campo Anual	Liminf	ModeloM/ ExAnual	Limsup	Modelo comp	comuna
167	0,67	0,65	0,99	1,51	0,66	MELIPILLA
200	0,62	0,65	1,03	1,52	0,64	CURACAVI
445	0,65	0,65	1,03	1,52	0,67	MAIPU
482	0,62	0,65	1,07	1,52	0,66	BUIN
573	0,67	0,65	1,04	1,51	0,69	TIL TIL
578	0,65	0,65	1,05	1,52	0,69	MACUL
622	0,65	0,66	1,06	1,53	0,69	LA PINTANA
908	0,67	0,65	1,1	1,52	0,74	LAS CONDES
1492	0,65	0,65	1,28	1,52	0,84	SAN JOSE
1744	0,7	0,65	1,31	1,52	0,92	LO BARNECHEA

13.2. Anexo mapas

# Dosis Teórica de RIA 95 días



0 10 20 40 60 80 Kilómetros  
Escala de referencia: 1 : 1,400,000

### Simbología

- Puntos de muestreo
- Límite regional
- Límite área de estudio
- Chile Continental
- Área de estudio

### RIA 95 días

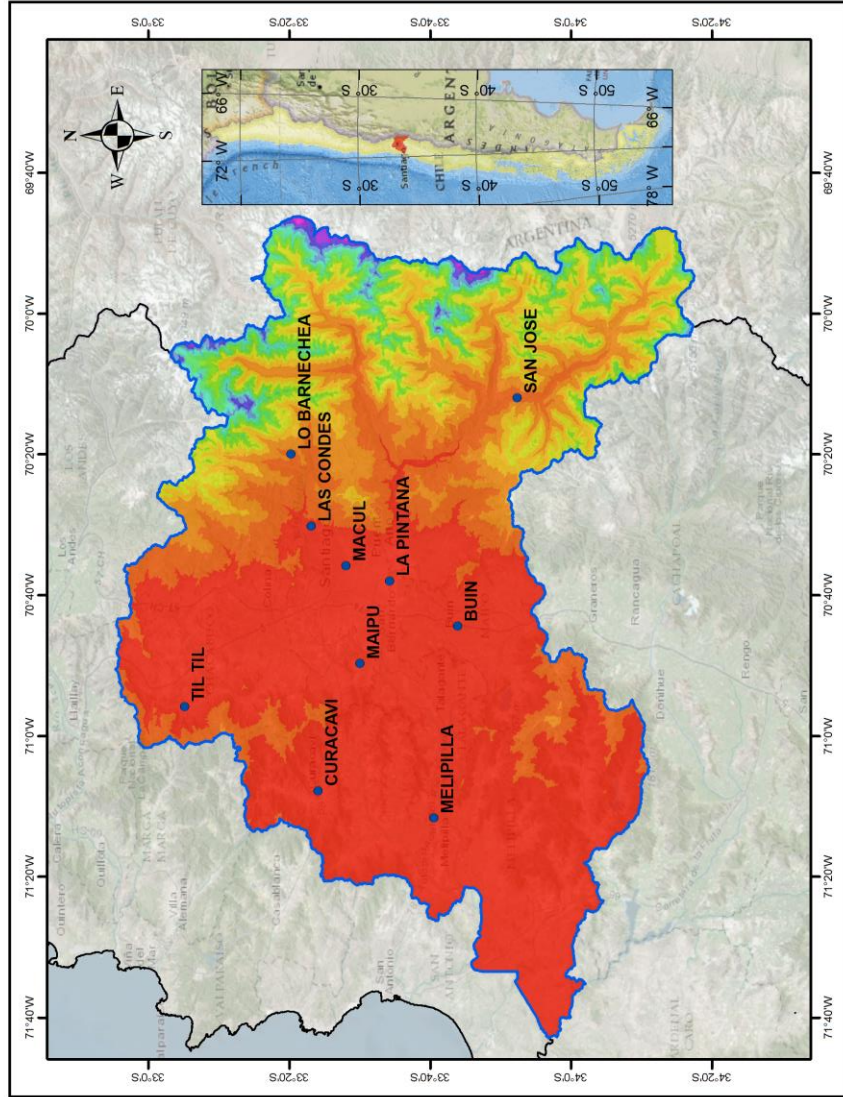
- 0.168 - 0.225
- 0.226 - 0.339
- 0.340 - 0.461
- 0.462 - 0.575
- 0.576 - 0.688
- 0.689 - 0.802
- 0.803 - 0.934
- 0.935 - 1.085
- 1.086 - 1.274
- 1.275 - 1.501
- 1.502 - 1.794
- 1.795 - 2.578

Sistema de Coordenadas:  
GCS WGS 1984

Datum: WGS 1984

Unidades: Grados

# Dosis Teórica de RIA anual



## Simbología

- Puntos de muestreo
- Límite regional
- Límite área de estudio
- Chile Continental
- Área de estudio

## RIA anual

0.647 - 0.865
0.866 - 1.301
1.302 - 1.773
1.774 - 2.208
2.209 - 2.644
2.645 - 3.080
3.081 - 3.588
3.589 - 4.169
4.170 - 4.895
4.896 - 5.767
5.768 - 6.893
6.894 - 9.906

Sistema de Coordenadas:

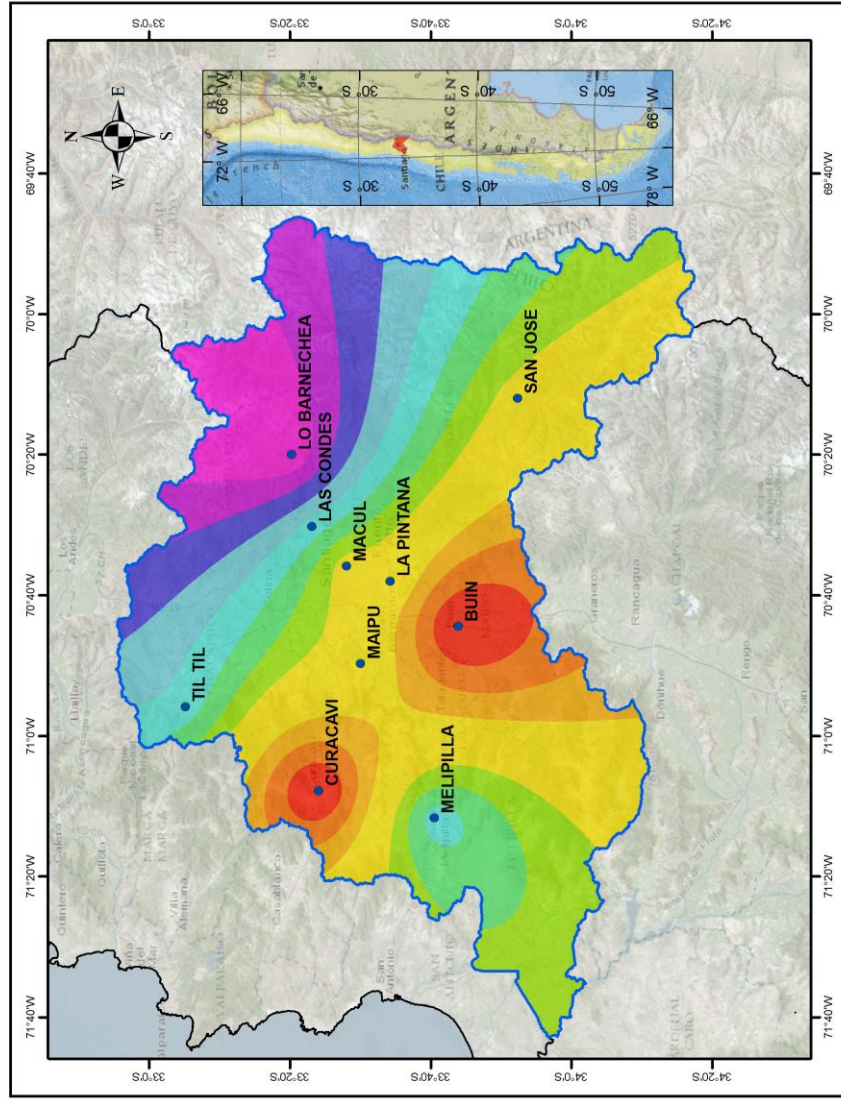
GCS WGS 1984

Datum: WGS 1984

Unidades: Grados

0 10 20 40 60 80 Kilómetros  
Escala de referencia: 1 : 1,400,000

# Dosis Estimada de RIA 95 días



**Simbología**

- Puntos de muestreo
- Limite regional
- Limite área de estudio
- Chile Continental
- Área de estudio

**RIA 95 días**

0.150 - 0.159
0.160 - 0.166
0.167 - 0.172
0.173 - 0.178
0.179 - 0.184
0.185 - 0.190
0.191 - 0.196
0.197 - 0.203
0.204 - 0.210
0.211 - 0.217
0.218 - 0.223
0.224 - 0.230

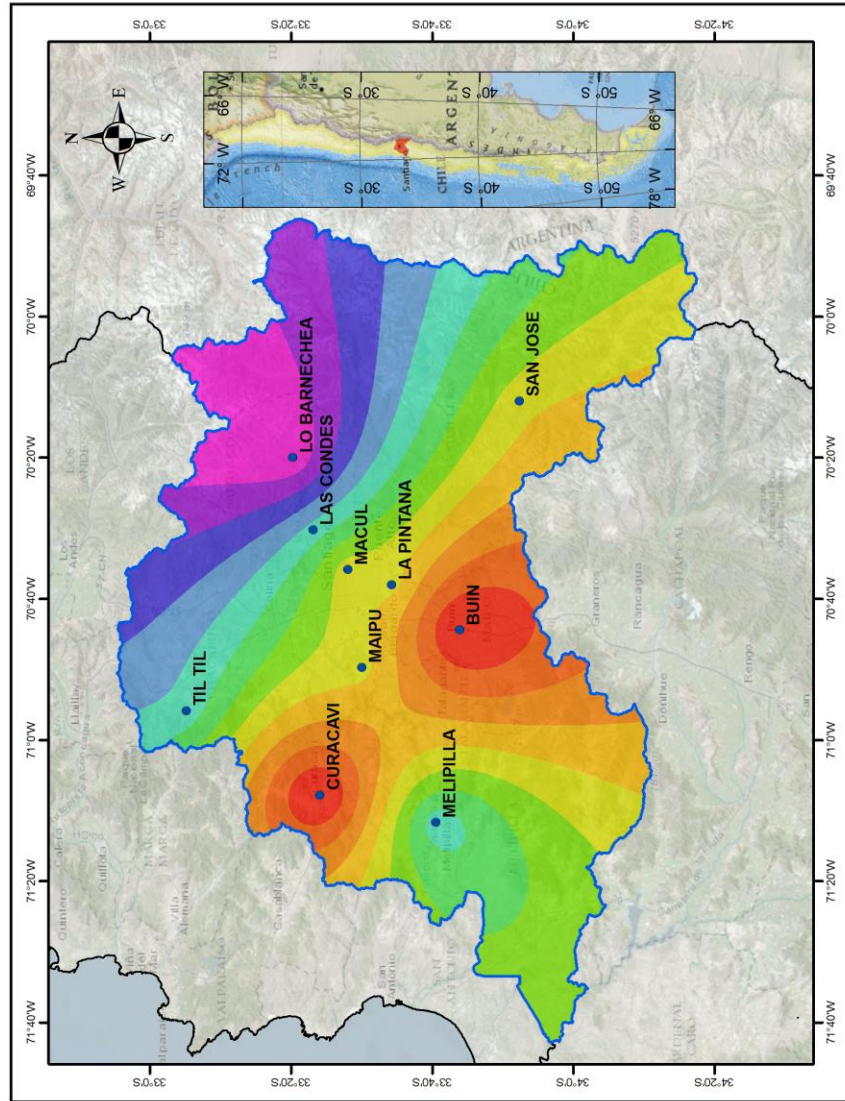
Sistema de Coordenadas:  
GCS WGS 1984

Datum: WGS 1984

Unidades: Grados

0 10 20 40 60 80 Kilómetros  
Escala de referencia: 1: 1,400,000

# Dosis Estimada de RIA anual



0 10 20 40 60 80 Kilómetros  
Escala de referencia: 1 : 1,400,000

## Simbología

- Puntos de muestreo
- ▭ Límite regional
- ▭ Límite área de estudio
- ▭ Chile Continental
- ▭ Área de estudio

## RIA anual

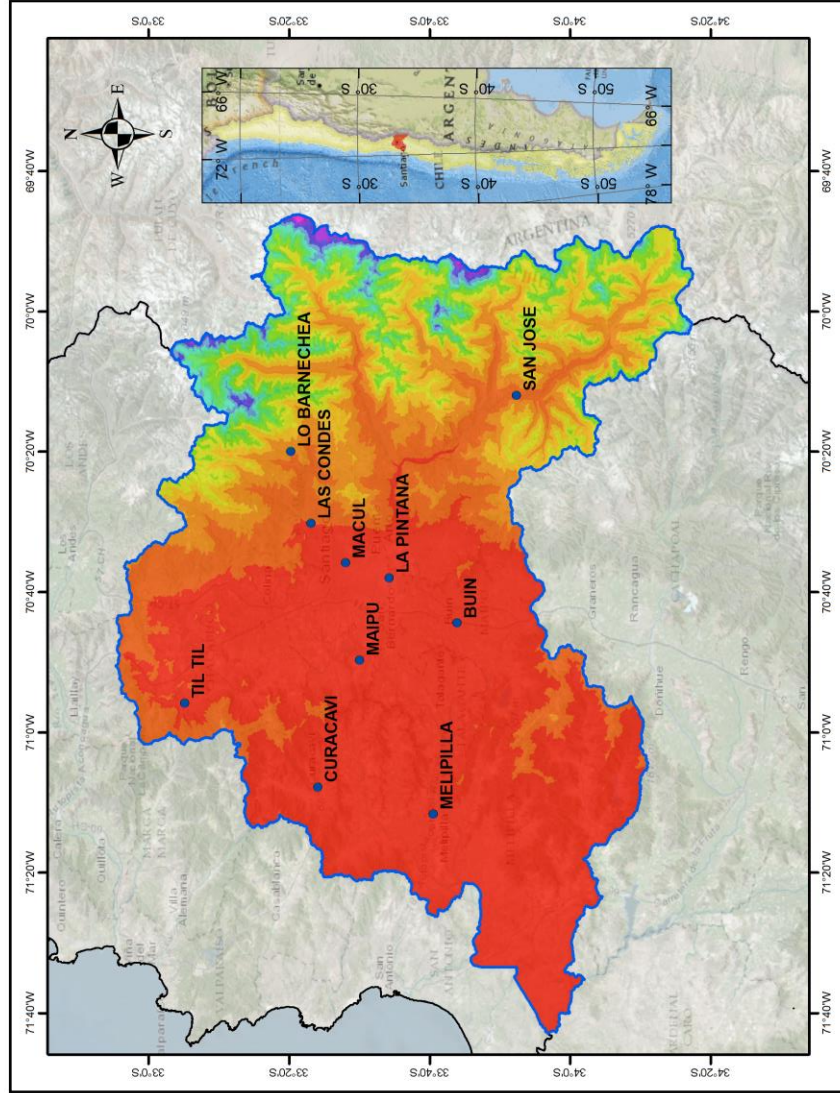
- 0.624 - 0.634
- 0.635 - 0.640
- 0.641 - 0.646
- 0.647 - 0.652
- 0.653 - 0.658
- 0.659 - 0.664
- 0.665 - 0.670
- 0.671 - 0.677
- 0.678 - 0.684
- 0.685 - 0.691
- 0.692 - 0.698
- 0.699 - 0.704

Sistema de Coordenadas:  
GCS WGS 1984

Datum: WGS 1984

Unidades: Grados

# Dosis Compensada de RIA 95 días



## Simbología

- Puntos de muestreo
- Límite regional
- Límite área de estudio
- Chile Continental
- Área de estudio

## RIA 95 días

- 0.160 - 0.204
- 0.205 - 0.262
- 0.263 - 0.326
- 0.327 - 0.384
- 0.385 - 0.442
- 0.443 - 0.505
- 0.506 - 0.573
- 0.574 - 0.651
- 0.652 - 0.743
- 0.744 - 0.859
- 0.860 - 1.015
- 1.016 - 1.398

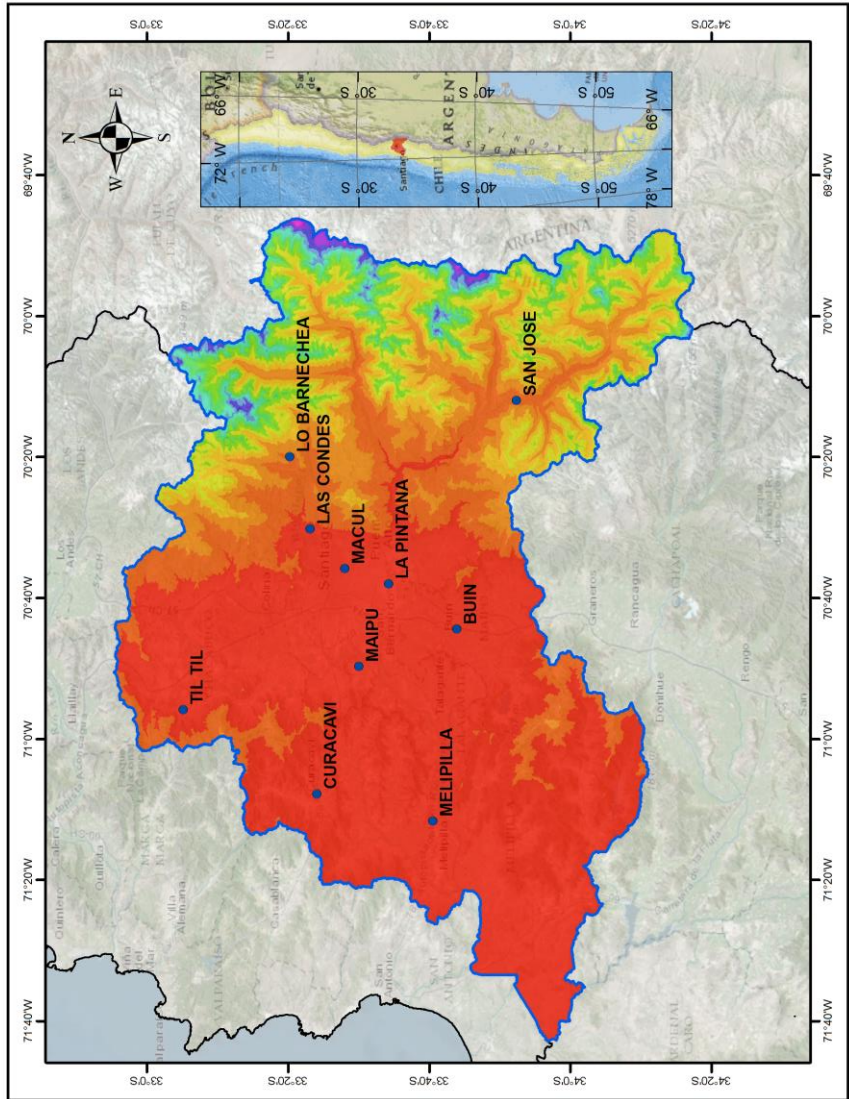
Sistema de Coordenadas:  
GCS WGS 1984

Datum: WGS 1984

Unidades: Grados

0 10 20 40 60 80 Kilómetros  
Escala de referencia: 1:1,400,000

# Dosis Compensada de RIA anual



0 10 20 40 60 80 Kilómetros  
Escala de referencia: 1 : 1,400,000

Simbología	
•	Puntos de muestreo
□	Límite regional
□	Límite área de estudio
□	Chile Continental
□	Área de estudio
RIA anual	
□	0.640 - 0.768
□	0.769 - 0.987
□	0.988 - 1.225
□	1.226 - 1.444
□	1.445 - 1.663
□	1.664 - 1.901
□	1.902 - 2.157
□	2.158 - 2.449
□	2.450 - 2.796
□	2.797 - 3.235
□	3.236 - 3.819
□	3.820 - 5.299

Sistema de Coordenadas:  
GCS WGS 1984  
Datum: WGS 1984  
Unidades: Grados