

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ANÁLISIS DE RIESGO DE GAS RADÓN EN EL PROYECTO
DE CONSTRUCCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA
DE SANTA TERESA”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

GERMAN LUCIO VALENCIA ALTAMIRANO

LIMA – PERÚ

2013

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado:

A mis padres, Germán y Griselda

Por haberme apoyado en todo momento de mi vida, por sus consejos, por sus enseñanzas y valores, y desde el cielo a mi padre a quien tengo presente siempre al momento de vencer restricciones y pruebas en la vida.

A mi esposa, Aydee

Por ser la compañera de mi vida y mi gran amor.

A mi hijo Esteban

Quien desde su llegada, fue una inspiración completa para materializar los proyectos de mi vida.

A mis hermanos, Rubén y Aida

Por apoyarme siempre en mis decisiones y por creer siempre en mi capacidad y profesionalismo.

AGRADECIMIENTO

Debo agradecer de forma especial, al Ing. Emerson Collado por aceptar ser mi guía en este informe y al Ing. Jorge Martínez del IPEN por su apoyo y recomendaciones, fueron un aporte invaluable en la ejecución del presente documento.

RESUMEN

Recientemente en Latinoamérica, se viene tomando interés sobre el radón, un gas de origen natural producto de la descomposición del uranio y su progenie radiactiva, que está presente en la corteza terrestre en diferentes concentraciones y que de acuerdo a las características geológicas del suelo y condiciones meteorológicas del lugar puede comportar diferentes tasas de exhalación al medio ambiente y estar presente en viviendas y centros de trabajo que ocupamos en todo momento en nuestra vida cotidiana.

Las organizaciones de salud pública como la Organización Mundial de Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) advierten que la exposición a este gas puede producir cáncer pulmonar.

El presente informe, consiste en la evaluación del riesgo de gas radón existente en las excavaciones subterráneas de la Central Hidroeléctrica de Santa Teresa en base a la metodología de análisis de riesgo impuesto por la legislación existente y criterios sobre protección radiológica.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCION	11
1.1. Fuentes radiactivas naturales	12
1.2. Antecedentes de exposición a concentraciones elevadas de radiactiva natural	14
1.3. Ubicación del proyecto donde se realizará el estudio	14
1.4. Descripción del Túnel de Conducción	16
II. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TECNICAS	19
2.1. Propiedades fisicoquímicas del radón	19
2.2. Toxicología del radón	20
2.2.1. Consideraciones toxicológicas sobre inhalación de radón	21
2.2.2. Consideraciones toxicológicas sobre ingestión de radón	21
2.2.3. Estudios epidemiológicos	22
2.3. Fundamentos para el cálculo de la concentración de radón	24
2.3.1. Emanación	24
2.3.2. Exhalación	24
2.3.3. Factores que influyen en la concentración de radón en el medio ambiente	24
2.3.4. Descomposición del uranio y su progenie radiactiva	25

2.4.	Legislación aplicable	26
2.4.1.	Reglamento de seguridad radiológica – DS N° 001-2004-EM	27
2.4.2.	Norma de Salud TS N°068 – MINSA/DGSP-V1	28
2.5.	Evaluación de riesgos impuesta por la legislación	28
III.	DESARROLLO DEL ANALISIS DE RIESGO	31
3.1.	Análisis geológico	31
3.1.1.	Litología de las excavaciones subterráneas	31
3.2.	Estimación del contenido de uranio en la roca granítica	33
3.3.	Calculo del contenido de radio en la roca granítica	33
3.4.	Calculo del caudal de aire	34
3.5.	Calculo de la tasa de renovación de aire	38
3.6.	Calculo del porcentaje de renovación de aire	39
3.7.	Calculo de la exhalación y concentración de radón	42
3.7.1.	Medición de densidad y porosidad aparente por tipo de roca	42
3.8.	Calculo de la dosis de radón	46
3.9.	Evaluación del riesgo de exposición a gas radón	48
IV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
4.1.	Conclusiones	49
4.2.	Recomendaciones	52
V.	REFERENCIAS	53

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Exposición promedio del hombre a fuentes radiactivas naturales y artificiales	13
Figura 2: Dosis individual media en la población mundial debido a la exposición a distintas fuentes radiactivas en mSv/año	13
Figura 3: Mapa de ubicación de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa	15
Figura 4: Esquema de planta de la Casa de Máquinas de Central Hidroeléctrica Santa Teresa	16
Figura 5: Vista de la ventana N°01 del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.	17
Figura 6: Vista de la ventana N°02 del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.	17
Figura 7: Vista de Los trabajos de ejecución que se realizan en el interior del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa	18
Figura 8: Cuadro estadístico sobre mortalidad debido a cáncer en EEUU - 2009	21
Figura 9: Esquema de emanación de radón del suelo	24
Figura 10: Descomposición radiactiva natural desde Rn ²²² al Pb ²¹⁰	25
Figura 11: Descomposición radiactiva natural desde U ²³⁸ al Pb ²⁰⁶	26
Figura 12: Levantamiento de datos en túnel de conducción (velocidad del aire, humedad y temperatura)	35
Figura 13: Equipo AMPROBE modelo TMA 40-A, utilizado para el levantamiento de datos (velocidad del aire, humedad y temperatura)	35
Figura 14: Velocidad del aire a lo largo del túnel de conducción	41

Figura 15:	Porcentaje de renovación de aire a lo largo del túnel de conducción	41
Figura 16:	Concentración de radón a lo largo del túnel de conducción	46
Figura 17:	Dosis de radón en túnel de conducción y dosis de radón promedio	49
Figura 18:	Ubicación de los lugares con disminución de la ventilación asociada al incremento de la dosis de radón en el túnel de conducción	51

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1:	Propiedades fisicoquímicas del radón 19
Tabla 2:	Tasa de incidencia de cáncer pulmonar por exposición a gas radón en personas fumadores 22
Tabla 3:	Tasa de incidencia de cáncer pulmonar por exposición a gas radón en personas no fumadores 23
Tabla 4:	Resumen sobre riesgo de enfermar de cáncer de pulmón en personas fumadores y no fumadores de acuerdo a las concentraciones de radón 23
Tabla 5:	Límite de Dosis - del Reglamento de Seguridad Radiológica DS N° 001-2004-EM, como base para el criterio de la evaluación del riesgo 29
Tabla 6:	Criterio de evaluación del riesgo impuesta por la legislación específica en base a la normativa nacional de seguridad radiológica 30
Tabla 7:	Litología del Túnel de Conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa 31
Tabla 8:	Tipo de roca por progresiva en túnel de conducción 32
Tabla 9:	Contenido de uranio en diferentes tipos de roca 33
Tabla 10:	Resultado de mediciones de velocidad del aire en túnel de conducción 36
Tabla 11:	Resultado del cálculo del caudal de aire en túnel de conducción 37

Tabla 12:	Resultado del cálculo de tasa de renovación de aire	38
Tabla 13:	Resultado del cálculo del porcentaje de renovación de aire relativa	40
Tabla 14:	Resultado de los ensayos de propiedades físicas para obtención de la densidad y porosidad aparente	43
Tabla 15:	Densidad y porosidad según tipo de roca	43
Tabla 16:	Exhalación y concentración de Rn ²²²	45
Tabla 17:	Dosis de radón en túnel de conducción – $f(100\%)$	47
Tabla 18:	Dosis de radón promedio en túnel de conducción asumiendo coeficientes de emanación desde 70% hasta 100%	48
Tabla 19:	Progresivas del túnel de conducción con dosis de radón por encima de lo normado en la legislación $> 1\text{mSv/a}$	51

I. INTRODUCCION

En la actualidad, en nuestro país, así como en gran parte de Latinoamérica, el tema de salud asociado a la exposición al radón en viviendas y centros de trabajo, no está siendo considerado, por falta de una legislación específica sobre radón y estudios técnicos sobre fuentes radiactivas naturales, en cada región de nuestro país.

En el presente informe, se analiza el riesgo de la exposición al radón en interior del túnel de conducción durante la construcción de la Central Hidroeléctrica de Santa Teresa, para ello, revisaremos la información toxicológica y epidemiológica del radón y su asociación al cáncer pulmonar, se utilizarán estudios geológicos del lugar y mediciones de campo, para estimar de forma teórica, la tasa de exhalación del radón a partir de la concentración del uranio presente en la roca granítica del túnel y calcular finalmente la dosis efectiva de radiactividad proveniente del radón y su comparación con la legislación existente nos determinará el nivel de riesgo.

En el capítulo 2 se revisarán las propiedades fisicoquímicas del radón y analizará su toxicología y epidemiología, en adición se desarrollarán los conceptos básicos de emanación, exhalación de radón, descomposición radiactiva del U^{236} contenido en el suelo hasta la generación del gas Rn^{222} y los factores que influyen en la concentración de radón y por último, la legislación nacional existente y conceptos sobre el método de evaluación del riesgo impuesto por la legislación.

En el capítulo 3 se desarrollará el análisis del riesgo específico, revisando primero la litología de las excavaciones subterráneas, el contenido de uranio presente en la roca granítica del túnel de conducción para el cálculo de la cantidad de radio en la roca granítica, en adición se calculará el caudal de aire en interior del túnel, su tasa de renovación y porcentaje de renovación de aire para posteriormente calcular la tasa de exhalación y concentración de radón para finalizar con la evaluación del riesgo.

En el capítulo 4 se plantearán las recomendaciones y conclusiones del estudio.

Finalmente en el capítulo 5 se enumeran las referencias utilizadas para la elaboración de este informe.

1.1. Fuentes radiactivas naturales

La exposición de los seres humanos a las fuentes naturales de radiación es una característica continua e inevitable de la vida en la tierra. Para la mayor parte de las personas esta exposición excede a todas las generadas por fuentes artificiales combinadas. Hay dos contribuyentes fundamentales a las exposiciones a la radiación natural: las partículas de alta energía de los rayos cósmicos que inciden en la atmósfera terrestre y los radionucleídos de la corteza terrestre presentes en todo el medio ambiente.

Muchas exposiciones a fuentes de radiación natural se modifican por la acción humana. En particular, se liberan al medio ambiente radionucleídos naturales en el procesado de minerales y en actividades de construcción e industriales como la producción de fertilizantes fosfatados y la utilización de combustibles fósiles, provocando incremento de las exposiciones a esta radiación natural.

Muchas personas sufren incrementos de la exposición a la radiación natural en sus lugares de trabajo, tales como las minas subterráneas, el procesado de minerales y la tripulación de aeronaves.

La relevancia de la exposición a la radiación natural se confirma por el hecho de que para la mayoría de las personas las exposiciones a la radiación natural de fondo son mucho más significativas que las exposiciones debidas a fuentes artificiales, salvo excepciones. Entre estas excepciones se pueden señalar las exposiciones médicas, los accidentes con liberación de radionucleidos y algunos lugares de trabajo específicos.

En todos los casos, sin embargo, el fondo natural de radiación forma la base sobre la que se añaden todas las demás exposiciones y es un nivel común que sirve de comparación para otras exposiciones.

En nuestro país, la exposición a la radiación natural no está regulada por una legislación específica, como si ocurre en Europa y Estados Unidos.

Donde se cuenta con normativas con criterios radiológicos para el desarrollo de reglamentación sanitaria sobre los valores de concentraciones de radón admisibles y los valores de exención/desclasificación de residuos que contengan fuentes naturales de radiación.

En la Figura 1⁽³⁾ se muestra un cuadro sobre la exposición promedio del hombre a las fuentes radiactivas de origen natural y artificial

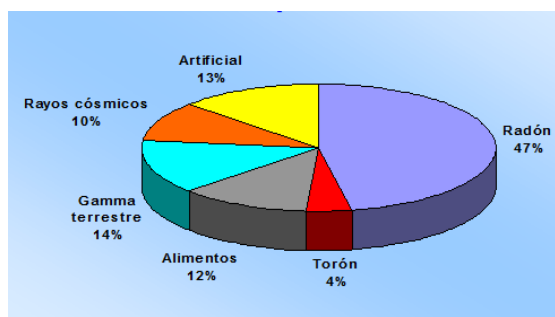


Figura 1: Exposición promedio del hombre a fuentes radiactivas naturales y artificiales

Fuente: <http://www.csn.es>

En la Figura 2⁽⁴⁾ se muestra un cuadro sobre la dosis individual media en la población mundial debido a la exposición a distintas fuentes radiactivas en mSv/año

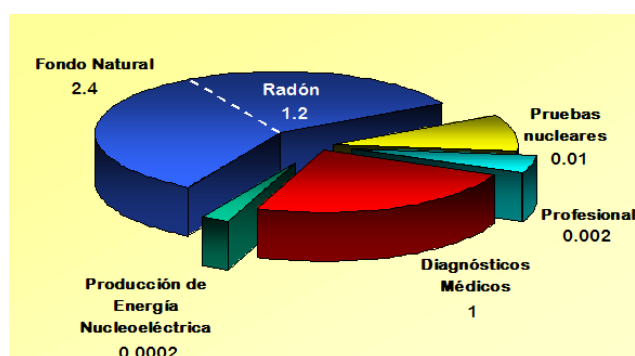


Figura 2: Dosis individual media en la población mundial debido a la exposición a distintas fuentes radiactivas en mSv/año

Fuente: <http://nuclear.fis.ucm.es/FERIA/FERIA2.html>

1.2. Antecedentes de exposición a concentraciones elevadas de radiación natural

En 1985, en los Estados Unidos. Stanley Watras, un ingeniero electricista empleado de la Planta Nuclear de Limerick en Filadelfia que residía en Boyertown (Pensilvania, EEUU), como todos los empleados, al salir de la planta debía someterse a la medición de la radiactividad, supuestamente adquirida durante las horas laborables. En diciembre de 1984 y como un hecho incomprensible en aquellos tiempos, la alarma indico altos niveles de radiactividad en el cuerpo del ingeniero Watras al ingresar a trabajar a la planta nuclear. Este hecho llevo a la realización de detalladas investigaciones, las cuales confirmaron la existencia de altos niveles de radiactividad causados por el gas radón acumulado en su vivienda. Su esposa y sus hijos presentaban altos niveles de radiactividad en sus cuerpos debido a la existencia de elevados niveles de radón en el aire interno de su vivienda, equivalentes a las dosis radiactivas que sobre los alveolos pulmonares puede recibir un fumador que consume 3280 cigarrillos diarios.

Este suceso fue el inicio de las investigaciones que confirmaron que no solamente se puede adquirir cáncer pulmonar respirando dentro de los socavones de las minas o consumiendo tabaco, sino también respirando altas concentraciones de gas radón durante largos periodos de tiempo dentro de viviendas y/o lugares de trabajo.

1.3. Ubicación del proyecto donde se realizará el estudio

El Proyecto Central Hidroeléctrica Santa Teresa se desarrolla en los distritos de Santa Teresa y Machupicchu, de las provincias de La Convención y Urubamba, respectivamente, de la región Cusco y es construido por el Consorcio Rio Urubamba formado por las empresas ASTALDI de Italia y la constructora peruana GyM para el cliente Luz del Sur

La Casa de máquinas en caverna y los túneles de acceso y descarga se ubican aguas abajo del Cruce del puente Carrilluchayoc, en la margen derecha del río Vilcanota y a 1 km del poblado de Ccollpani.

En la Figura 3⁽¹³⁾ se presenta el mapa de ubicación de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.



Figura 3: Mapa de ubicación de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa

Fuente: EIA Central Hidroeléctrica Santa Teresa

1.4. Descripción del Túnel de Conducción

1.4.1. Túnel de Conducción:

El túnel de conducción a presión tiene longitud de 3,446 m. La sección transversal es en herradura, con un diámetro de 4.4 m. La sección optimizada resultante es de un túnel con diámetro interior de 4.4 m y una pendiente de 5%.

En la Figura 4⁽⁷⁾ se presenta una vista de planta de las excavaciones subterráneas que incluyen el túnel de conducción y la casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.

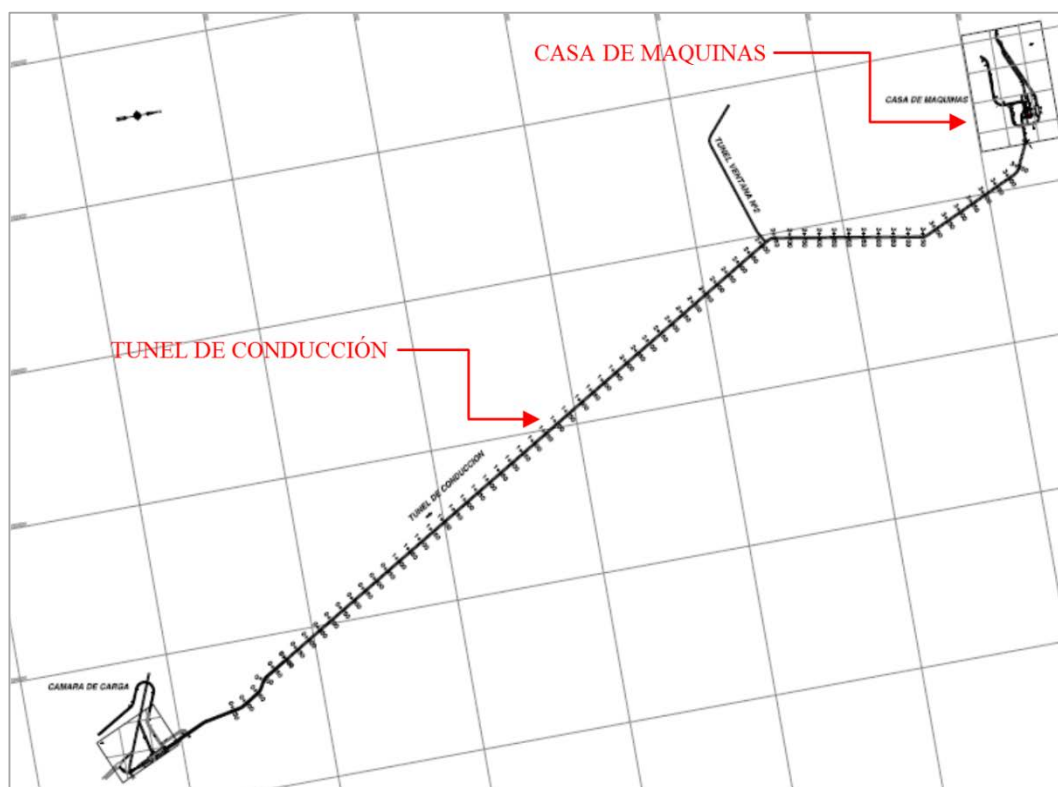


Figura 4: Esquema de planta de la Central Hidroeléctrica de Santa Teresa.

Fuente: Departamento de Ingeniería del Consorcio Rio Urubamba

En la Figura 5 se presenta una vista de la ventana N°01 del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica de Santa Teresa



Figura 5: Vista de la ventana N°01 del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.

Fuente: Departamento de Ingeniería del Consorcio Rio Urubamba

En la Figura 6 se presenta una vista de la ventana N°02 del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica de Santa Teresa



Figura 6: Vista de la ventana N°02 del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.

Fuente: Departamento de Ingeniería del Consorcio Rio Urubamba

En la Figura 7 se presenta una vista de los trabajos de ejecución en el interior del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica de Santa Teresa



Figura 7: Vista de Los trabajos de ejecución que se realizan en el interior del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.

Fuente: Departamento de Ingeniería del Consorcio Rio Urubamba

II. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TECNICAS

2.1. Propiedad físico químicas del radón

El radón pertenece a la familia de los gases nobles, es un gas incoloro, inodoro e insípido, tiene ausencia de reactividad química y es soluble en el agua y otros líquidos.

Tabla 1⁽¹⁶⁾: Propiedades fisicoquímicas del radón

Propiedad	Valor	Unidad
Punto de fusión	202 / -71	°K / °C
Calor específico	94	J/(K*Kg)
Entalpía de fusión	2.89	KJ/Mol
Punto de vaporización	16.4	KJ/Mol
Punto de ebullición	211.3 / -62	°K / °C
Conductividad térmica	0.00364	W/(K*m)
Densidad (0°C y 1atm)	9.73	Kg/m ³
Coefficiente de difusión en el aire	0.1x10 ⁻⁵	m ² /s
Viscosidad (20°C y 1atm)	229.0	Micropoises
Solubilidad en agua (20°C y 1atm)	230x10 ⁻⁶	m ³ /Kg
Constante de desintegración del radón (λ_{Rn})	0.0075536	h ⁻¹

2.2. Toxicología del radón

El radón es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la International Agency for Research on Cancer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency -EPA) de EE.UU., que lo clasifican como carcinógeno del Grupo 1 y del Grupo A, respectivamente.

El principal efecto adverso derivado de la inhalación de radón y en especial de sus productos de desintegración es el riesgo de cáncer de pulmón.

De acuerdo a la EPA, alrededor de 20,000 muertes anuales por cáncer pulmonar están asociadas con la exposición al radón y es la segunda causa principal de cáncer pulmonar, luego del tabaquismo.

El radón, como gas, no es retenido de forma significativa en el tracto respiratorio. Sin embargo, un 90% de sus descendientes (productos de la descomposición radioactiva) puede estar unido a partículas de aerosoles presentes en el aire, las cuales, en función de su tamaño, pueden ser retenidas a distintos niveles del sistema respiratorio. Las más pequeñas, la fracción respirable, alcanzarán las zonas más sensibles del tejido bronquial y pulmonar, depositándose allí, juntamente con el 10% restante de los productos de desintegración. La deposición de estas partículas, junto con estos productos genera una fuente de emisión de partículas α de alta densidad. En consecuencia, una parte de este tejido recibe una exposición elevada, aumentando la posibilidad de desarrollar un proceso cancerígeno. La dosis recibida en el pulmón por radiación β o γ es despreciable frente a la debida a las partículas α .

En la Figura 8⁽¹⁹⁾ se muestra un cuadro estadístico sobre la mortalidad de cáncer en EEUU – 2009

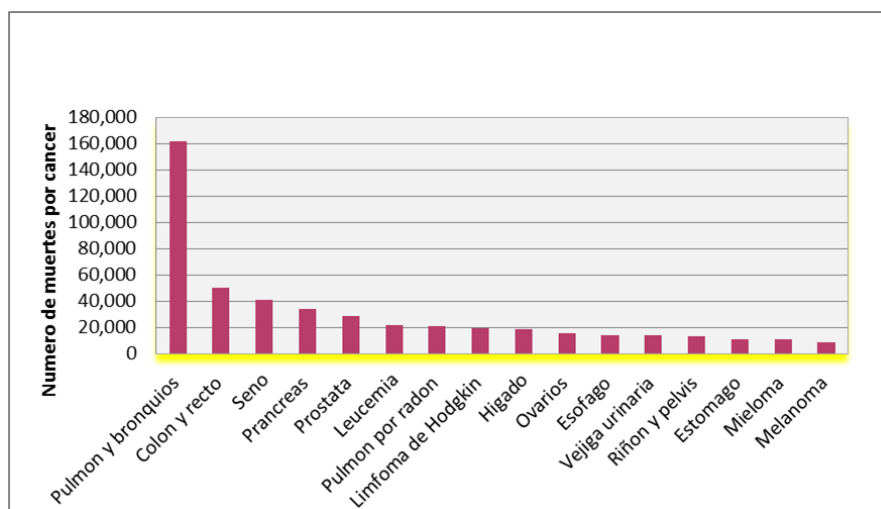


Figura 8: Cuadro estadístico sobre mortalidad debido a cáncer en EEUU - 2009

Fuente: www.cancer.org/espanol/index

2.2.1. Consideraciones toxicológicas sobre la inhalación de radón:

- Mayor probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón después de 5 – 25 años de exposición al radón, en adición la probabilidad aumenta si la persona es fumadora.
- Los depósitos de Rn222 y sus hijos de corta vida se producen en la zona bronquial.
- El cáncer del pulmón puede ocurrir y dependerá del nivel de concentración de Radón.

2.2.2. Consideraciones toxicológicas sobre la ingestión de radón:

- Alto riesgo de daño en las células por la acción de las partículas α .
- Mayor probabilidad de desarrollar cáncer de estómago.

2.2.3. Estudios epidemiológicos del radón:

La incidencia de cáncer pulmonar asociado a exposición a gas radón para las personas que nunca han fumado es de 0.73% que quiere decir que de 1,000 personas que nunca han fumado 7.3 adquirirán la enfermedad de cáncer pulmonar.

Para los fumadores el riesgo de contraer cáncer pulmonar es mayor debido a los efectos de la combinación del gas radón con el humo de tabaco.

Entre los fumadores, la incidencia de cáncer pulmonar asociada a la exposición a gas radón es de 6.2% que quiere decir que de 1,000 personas unas 62 adquirirán la enfermedad de cáncer pulmonar.

Al respirar el gas radón y sus descendientes, se depositan en las células del epitelio que reviste las vías respiratorias, donde las partículas α puede producir cáncer pulmonar.

Tabla 2⁽¹¹⁾: Tasa de incidencia de cáncer pulmonar por exposición a gas radón en personas fumadores

N	Nivel de radón (pCi/L)	Tasa de Incidencia (%)	Cantidad de personas con riesgo de enfermedad de cáncer pulmonar
1	20	0.26	260
2	10	0.15	150
3	8	0.12	120
4	4	0.062	62
5	2	0.032	32
6	1.3	0.020	20

Fuente: <http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html>

Tabla 3⁽¹¹⁾: Tasa de incidencia de cáncer pulmonar por exposición a gas radón en personas no fumadores

N	Nivel de radón (pCi/L)	Tasa de Incidencia (%)	Cantidad de personas con riesgo de enfermedad de cáncer pulmonar
1	20	0.036	36
2	10	0.018	18
3	8	0.015	15
4	4	0.007	7
5	2	0.004	4
6	1.3	0.002	2

Fuente: <http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html>

Tabla 4⁽¹¹⁾: Resumen sobre riesgo de enfermar de cáncer de pulmón en personas fumadores y no fumadores

Concentración de radón		Cantidad de personas con riesgo de enfermar de cáncer al pulmón por cada 1000 personas		Riesgo de enfermar de cáncer al pulmón	
Bq/m ³	pCi/l	No fumadores	Fumadores	No fumadores	Fumadores
740	20	36	260	3.60%	26.00%
370	10	18	150	1.80%	15.00%
296	8	15	120	1.50%	12.00%
148	4	7	52	0.70%	5.20%
74	2	4	32	0.40%	3.20%

Fuente: <http://www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html>

2.3. Fundamentos sobre concentración de radón

Para entender el mecanismo de descomposición radiactiva de la fracción de Ra^{226} que forma parte del suelo y que pasa a gas Rn^{222} ocupando los poros del terreno y posteriormente escapando a la atmosfera, definiremos los siguientes conceptos:

2.3.1. Emanación

La emanación de radón se define como la fracción de gas que pasa del sólido a los poros del terreno.

En la Figura 09⁽¹⁵⁾ se presenta un esquema sobre el mecanismo de emanación de radón del suelo.

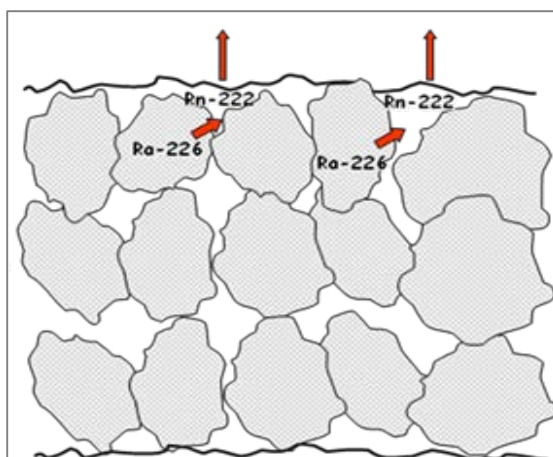


Figura 09: Esquema de emanación de radón del suelo.

Fuente: Safety Reports Serie N°33 IAEA Viena 2003

2.3.2. Exhalación

La exhalación del radón se define como la cantidad de gas que escapa a la atmosfera exterior.

2.3.3. Factores que influyen en la concentración de radón en el medio ambiente:

Según la Organización Internacional de Energía Atómica. OIEA. Viena 1997, los factores son los siguientes:

- Contenido de U-238 en el suelo (ppm).
- Contenido de Ra226 en el suelo (Bq/Kg).
- Porosidad del suelo.
- Permeabilidad del suelo.
- Tasa de renovación de aire.
- Factores atmosféricos (humedad, presión, Temperatura, Viento).

2.3.4. Descomposición del uranio y su progenie radiactiva

Los elementos radiactivos que forman que parte de la corteza terrestre y el gas radón que se emite durante su descomposición se difunde a través del aire por las grietas y porosidad del suelo y posteriormente es exhalado a la atmosfera, en cuyo seno, paralelamente a su difusión, las partículas de la progenie radiactiva continúan desintegrándose, produciendo otros descendientes radiactivos que se adhieren a las partículas de polvo presentes en la atmosfera.

En la Figura 10⁽⁵⁾ se presenta una esquematización de la descomposición radiactiva natural desde el Rn²²² al Pb²¹⁰

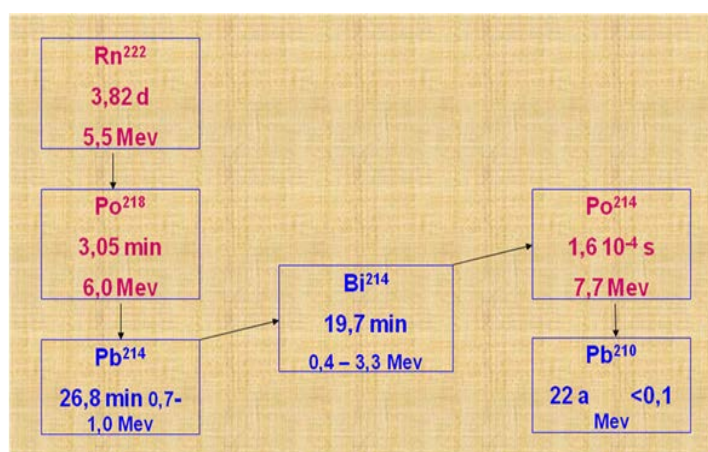


Figura 10: Descomposición radiactiva natural desde Rn²²² al Pb²¹⁰

Fuente: Departamento de Química Nuclear de la Universidad de Alcalá

En la Figura 11⁽⁵⁾ se presenta una esquematización de la descomposición radiactiva natural desde el Uranio-238 al Plomo-206.

TIPO DE RADIACION	NUCLEIDO	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION
α	Uranio-238	4.47 miles de millones de años
	Torio-234	24.1 días
β	Protactinio-234	1.17 minutos
	Uranio-234	245 000 años
α	Torio-230	8 000 años
	Radio-226	1 600 años
α	Radón-222	3.823 días
	Polonio-218	3.05 minutos
β	Plomo-214	26.8 minutos
	Bismuto-214	19.7 minutos
α	Polonio-214	0.000164 segundos
	Plomo-210	22.3 años
β	Bismuto-210	5.01 días
	Polonio-210	138.4 días
α	Plomo-206	

Figura 11: Descomposición radiactiva natural desde U^{238} al Pb^{206}

Fuente: Departamento de Química Nuclear de la Universidad de Alcalá

2.4. Legislación aplicable

La legislación nacional cuenta con normas de protección radiológica y de salud que se utilizará en la evaluación del riesgo.

2.4.1. Reglamento de seguridad radiológica – DS N° 001-2004-EM

A continuación se mencionan los cuatro primeros puntos del Anexo I del reglamento de seguridad radiológica, donde se regulan los límites de dosis de radiación, tanto para personas expuestas laboralmente y así como para el público en general expuesto no laboralmente.

1. Las dosis de los trabajadores expuestos ocupacionalmente deben limitarse de modo que no excedan:
 - a) 20 mSv de dosis efectiva en un año, como promedio, en un período de 5 años consecutivos,
 - b) 50 mSv de dosis efectiva en un año, siempre que no sobrepase 100 mSv en 5 años consecutivos,
 - c) 150 mSv de dosis equivalente en un año, en el cristalino,
 - d) 500 mSv de dosis equivalente en un año, para la piel y extremidades.
2. Para aprendices de 16 a 18 años en situación de capacitación para trabajar con radiaciones, y de estudiantes de 16 a 18 años que utilicen radiaciones en el curso de su formación, los límites de dosis son:
 - a) una dosis efectiva de 6 mSv en un año,
 - b) una dosis equivalente al cristalino de 50 mSv en un año,
 - c) una dosis equivalente a las extremidades o piel de 150 mSv en un año
3. La exposición al público como consecuencia de las prácticas no debe exceder de:
 - a) una dosis efectiva de 1 mSv por año,
 - b) una dosis equivalente en cristalino de 15 mSv por año,
 - c) una dosis equivalente a la piel de 50 mSv por año.
4. La exposición de personas que prestan asistencia voluntaria a pacientes, no como parte de su empleo u ocupación, debe restringirse de modo que sea improbable que su dosis exceda 5 mSv durante el

período que abarque el examen diagnóstico o tratamiento de cada paciente.

A continuación se menciona el anexo IV del reglamento de seguridad radiológica, donde se regulan los límites de concentración de radón para la remediación en casas y centros de trabajo.

1. El nivel de actuación para la exposición crónica de radón en viviendas es una concentración media anual de 200 a 600 Bq/m³ de Rn²²² en el aire.
2. El nivel de actuación para una acción reparadora en la exposición crónica a radón en puestos de trabajo es una concentración media anual de 1000 Bq/m³ de Rn²²² en aire.

2.5.2. Norma Técnica de Salud NTS N°068 – MINSA/DGSP-V1

Norma técnica de salud que establece el listado de enfermedades ocupacionales

.....

Radón	T.66	Neoplasia Maligna de bronquio y pulmón	de Minería subterránea, procesos con productos de la cadena radiactiva de origen natural U ²³⁸ , precursores del Rn ²²²
-------	------	--	---

.....

2.5. Evaluación de riesgos impuesta por la legislación

La evaluación del riesgo, es el proceso de aplicación sistemática de métodos capaces de identificar el riesgo, valorarlo, actuar sobre él, para controlarlo y hacer un seguimiento para poder priorizar la actuación y la efectividad de los resultados de la misma, siguiendo los principios de la mejora continua: planificar, ejecutar, controlar y ajustar.

En el presente informe, en ausencia de normas específicas sobre la exposición laboral a la radiación natural y su correspondiente regulación, se utilizará la legislación existente de seguridad radiológica, para la evaluación del riesgo específico de radón. Se considerará como riesgo alto si la dosis efectiva absorbida calculada es superior a la definida por la normativa legal aplicable y como riesgo aceptable si la dosis calculada es igual o inferior.

Las acciones de remediación y control serán diseñadas para reducir el riesgo a niveles aceptables, de ser necesario de acuerdo con los resultados del estudio y posteriormente realizar mediciones y ajustes dentro de la gestión de riesgos de lugar de trabajo.

No se considerará en la evaluación del riesgo, la normativa aplicable sobre la concentración de radón (Bq/m^3) en lugares de trabajo y/o viviendas sino la de protección radiológica sobre límite de dosis efectiva absorbida por los trabajadores expuestos, ya que esta tiene relación directa con el riesgo de daño a la salud.

Tabla 5: Límite de Dosis - del Reglamento de Seguridad Radiológica DS N° 001-2004-EM, como base para el criterio de la evaluación del riesgo

Ítem de la norma (N°)	Dosis (mSv/a)	Resumen de la normativa
3	1	La exposición al público como consecuencia de las prácticas, no debe de exceder de: 1mSv/a
2	6	Para aprendices de 16 a 18 años en situación de capacitación para trabajar con radiaciones, y de estudiantes de 16 a 18 años que utilicen radiaciones en el curso de su formación, los límites de dosis son: 6mSv/a
1	20	Las dosis de los trabajadores expuestos ocupacionalmente deben limitarse de modo que no excedan: 20mSv/a, como promedio, en un período de 5 años consecutivos.

Tabla 6: Criterio de evaluación del riesgo impuesta por la legislación específica en base a la normativa nacional de seguridad radiológica

Nº	Dosis (mSv/a)	Nivel de Riesgo
1	≤ 1	Ausencia de riesgo: Solo para personal que no trabaja con radiación o público en general – trabajadores expuestos a radón en el túnel de conducción de la C.H. Santa Teresa.
2	$<1 - 6]$	Riesgo aceptable: Solo para aprendices de 16 a 18 años en situación de capacitación para trabajar con radiaciones, y de estudiantes de 16 a 18 años que utilicen radiaciones en el curso de su formación, los límites de dosis son: 6mSv/a
3	$< 6 - 20]$	Riesgo aceptable: Solo para trabajadores expuestos ocupacionalmente, la dosis debe limitarse de modo que no exceda: 20mSv/a, como promedio, en un período de 5 años consecutivos. Ver si se puede reducir la dosis, requiere controles simples
4	>20	Riesgo inaceptable: Requiere establecer zonas controladas, análisis específico sobre la actividad para reducción de dosis si el trabajador excede el límite o no debe de permitirse.

III. DESARROLLO DEL ANALISIS DEL RIESGO

3.1. Análisis geológico

Se analiza el tipo de roca a lo largo del túnel de conducción y su contenido de U^{238} para los cálculos de concentración de radón en su interior.

3.1.1. Litología de las excavaciones subterráneas

Los diferentes tipos de roca de composición granítica encontrados en los sondajes del túnel, tienen diferentes propiedades físicas que nos servirán para el cálculo de exhalación de radón.

Tabla 7: Litología del Túnel de Conducción de la C.H. Santa Teresa ⁽⁶⁾

Nº	Progresiva	Tramo (m)	Litología
1	0+000 – 0+500	500	Granodiorita
2	0+500 – 0+600	100	Microdiorita
3	0+600 – 0+900	300	Granodiorita
4	0+900 – 1+100	200	Microdiorita
5	1+100 – 1+500	400	Granodiorita
6	1+500 – 1+700	200	Microdiorita
7	1+700 – 2+900	1200	Granodiorita
8	2+900 – 3+000	100	Diorita
9	3+000 – 3+100	100	Granodiorita – Microdiorita
10	3+100 – 3+200	100	Microdiorita
11	3+200 – 3+300	100	Granodiorita
12	3+300 – 3+400	100	Granodiorita – Pizarra
13	3+400 – 3+500	100	Microdiorita

Tabla 8: Tipo de roca por tramo en túnel de conducción ⁽⁶⁾

Tramo	Litología	Tipo de roca
0+000	Granodiorita	M3
0+100	Granodiorita	M4
0+200	Granodiorita	M3
0+300	Granodiorita	M4
0+400	Granodiorita	M2
0+500	Granodiorita	M2
0+600	Microdiorita	M4
0+700	Granodiorita	M3
0+800	Granodiorita	M3
0+900	Granodiorita	M3
1+000	Microdiorita	M3
1+100	Microdiorita	M3
1+200	Granodiorita	M3
1+300	Granodiorita	M3
1+400	Granodiorita	M3
1+500	Granodiorita	M3
1+600	Microdiorita	M3
1+700	Microdiorita	M3
1+800	Granodiorita	M3
1+900	Granodiorita	M2
2+000	Granodiorita	M2
2+100	Granodiorita	M3
2+200	Granodiorita	M3
2+300	Granodiorita	M3
2+400	Granodiorita	M3
2+500	Granodiorita	M4
2+600	Granodiorita	M3
2+700	Granodiorita	M2
2+800	Granodiorita	M3
2+900	Granodiorita	M3
3+000	Diorita	M3
3+100	Granodiorita / Microdiorita	M3
3+200	Microdiorita	M2
3+300	Granodiorita	M3
3+400	Granodiorita / Pizarra	M3
3+500	Microdiorita	M4

3.2. Estimación del contenido de uranio en la roca granítica

De la bibliografía sobre geología, Duque. E., G. “Manual de Geología para Ingenieros”, el contenido de uranio en rocas graníticas se muestran las siguientes tablas.

Tabla 9: Contenido de uranio en diferentes tipos de roca⁽¹⁰⁾

Tipo de Roca	U ²³⁸ (ppm)
Roca basáltica	0.6 - 1.0
Roca granítica	4.0 - 5.0
Arcillas	3.7
Arenas	0.5

Para el informe, se utiliza el mayor valor (5.0 ppm), para el cálculo del análisis de riesgo.

3.3. Cálculo de la concentración de radio en la roca granítica

Para calcular la concentración del Ra²²⁶, se utilizara la fórmula:

$$K = \frac{m_{U-238}}{m_{Ra-226}} = 2950000 \quad (1)$$

Dónde:

K: ----- Relación másica U²³⁸/Ra²²⁶

De acuerdo con el dato de la concentración de U²³⁸, obtenido de la bibliografía sobre el contenido de uranio en la roca granítica de la tabla N°10 y reemplazando en la fórmula (1), se obtiene la concentración de Ra²²⁶ en ppm.

$$m_{Ra-226} = \frac{5}{2950000} = 1.694 \times 10^{-6} \text{ ppm}$$

Ahora, para el cálculo de la actividad del Ra²²⁶, utilizaremos la fórmula ⁽¹⁹⁾:

$$A_{Ra-226} = \frac{m_{Ra-226} \cdot \lambda_{Ra-226} \cdot NA}{PA_{Ra-226}} \quad (2)$$

Dónde:

A_{Ra-226} : ----- Actividad del Radio (Bq/Kg)

m_{Ra-226} : ----- Masa del Radio (1.694×10^{-6} gr)

λ_{Ra-226} : ----- Constante de desintegración del radio ($4.94126 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$)

NA : ----- Número de Avogadro (6.023×10^{23})

PA_{Ra-226} : ----- Peso atómico del radio (226 gr)

Reemplazando los valores en la fórmula (2), se obtiene la actividad del Ra226 en Bq/kg

$$A_{Ra-226} = \frac{(1.694 \times 10^{-6} \times 4.94126 \times 10^{-8} \times 6.023 \times 10^{23})}{(226 \times 3600 \times 1000)}$$

$$A_{Ra-226} = 61.98 \approx 62 \text{ Bq/Kg}$$

3.4. Cálculo del caudal de aire

Para el cálculo del caudal de aire, utilizaremos la fórmula:

$$Q = V * A \quad (3)$$

Dónde:

Q : ----- Caudal (m³/s)

A : ----- Sección del túnel de conducción (m²)

V : ----- Velocidad del Aire (m/s), medido cada 100m en el túnel de conducción.

Reemplazando los valores de las mediciones de velocidad del aire en el túnel de conducción en la fórmula (3), se obtiene los resultados de caudal de aire en la tabla N° 12.

3.3.1. Mediciones de velocidad del aire en túnel de conducción

En la Figura 12 se presenta una vista fotográfica del levantamiento de datos de campo para el cálculo de concentración de radón, (velocidad del aire, humedad y temperatura)



Figura 12: Levantamiento de datos en túnel de conducción (velocidad del aire, humedad y temperatura)

Fuente: Departamento de Prevención de Riesgos del Consorcio Rio Urubamba

En la Figura 13 se presenta una vista fotográfica del equipo utilizado para el levantamiento de datos para el cálculo de la concentración de radón en el túnel de conducción de la C.H. Santa Teresa.



Figura 13: Equipo AMPROBE modelo TMA 40-A, utilizado para el levantamiento de datos (velocidad del aire, humedad y temperatura)

Fuente: Departamento de Prevención de Riesgos del Consorcio Rio Urubamba

Tabla 10: Resultado de mediciones de velocidad del aire en túnel de conducción

Tramo	V (m/s)	A (m ²)
0+000	0.00	36.14
0+100	1.40	36.14
0+200	1.00	36.14
0+300	0.90	36.14
0+400	1.20	36.14
0+500	1.10	36.02
0+600	1.00	36.02
0+700	1.30	36.02
0+800	1.20	36.02
0+900	1.10	36.02
1+000	1.10	36.02
1+100	1.00	36.02
1+200	1.20	36.02
1+300	0.60	36.02
1+400	0.50	36.02
1+500	0.80	36.02
1+600	0.50	36.02
1+700	1.00	36.02
1+800	0.80	36.14
1+900	0.50	36.14
2+000	0.40	36.14
2+100	0.30	36.14
2+200	0.30	36.14
2+300	0.21	36.14
2+400	0.20	36.14
2+500	0.30	36.14
2+600	1.40	36.14
2+700	1.10	36.14
2+800	0.80	36.14
2+900	0.75	36.14
3+000	0.70	36.14
3+100	0.55	36.14
3+200	0.40	36.14
3+300	0.30	36.14
3+400	0.30	36.14
3+500	0.20	36.14

Tabla 11: Resultado del cálculo del caudal de aire en túnel de conducción

Tramo	V (m/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /h)
0+000	0.00	36.14	0.00	
0+100	1.40	36.14	50.60	182145.6
0+200	1.00	36.14	36.14	130104.0
0+300	0.90	36.14	32.53	117093.6
0+400	1.20	36.14	43.37	156124.8
0+500	1.10	36.02	39.62	142639.2
0+600	1.00	36.02	36.02	129672.0
0+700	1.30	36.02	46.83	168573.6
0+800	1.20	36.02	43.22	155606.4
0+900	1.10	36.02	39.62	142639.2
1+000	1.10	36.02	39.62	142639.2
1+100	1.00	36.02	36.02	129672.0
1+200	1.20	36.02	43.22	155606.4
1+300	0.60	36.02	21.61	77803.2
1+400	0.50	36.02	18.01	64836.0
1+500	0.80	36.02	28.82	103737.6
1+600	0.50	36.02	18.01	64836.0
1+700	1.00	36.02	36.02	129672.0
1+800	0.80	36.14	28.91	104083.2
1+900	0.50	36.14	18.07	65052.0
2+000	0.40	36.14	14.46	52041.6
2+100	0.30	36.14	10.84	39031.2
2+200	0.30	36.14	10.84	39031.2
2+300	0.21	36.14	7.59	27321.8
2+400	0.20	36.14	7.23	26020.8
2+500	0.30	36.14	10.84	39031.2
2+600	1.40	36.14	50.60	182145.6
2+700	1.10	36.14	39.75	143114.4
2+800	0.80	36.14	28.91	104083.2
2+900	0.75	36.14	27.11	97578.0
3+000	0.70	36.14	25.30	91072.8
3+100	0.55	36.14	19.88	71557.2
3+200	0.40	36.14	14.46	52041.6
3+300	0.30	36.14	10.84	39031.2
3+400	0.30	36.14	10.84	39031.2
3+500	0.20	36.14	7.23	26020.8

3.5. Cálculo de la tasa de renovación de aire

Para el cálculo de la tasa de renovación de aire, utilizaremos la fórmula:

$$Tr = \frac{Q}{\psi} \quad (4)$$

Dónde:

Tr : ----- Tasa de renovación de aire por hora (h^{-1})

Q : ----- Caudal (m^3/h)

ψ : ----- Volumen de cada tramo (100m) del túnel de conducción (m^3)

Reemplazando los valores de caudal de aire en cada progresiva del túnel de conducción y su volumen correspondiente en la fórmula (4), se obtiene los resultados de la tasa de renovación de aire por hora, en la tabla N° 13.

Tabla 12: Resultado del cálculo de tasa de renovación de aire

Tramo	Q (m^3/h)	V (m^3)	Tasa de renovación de aire (h^{-1})
0+100	182145.6	3614	50.40
0+200	130104.0	3614	36.00
0+300	117093.6	3614	32.40
0+400	156124.8	3614	43.20
0+500	142639.2	3602	39.60
0+600	129672.0	3602	36.00
0+700	168573.6	3602	46.80
0+800	155606.4	3602	43.20
0+900	142639.2	3602	39.60
1+000	142639.2	3602	39.60
1+100	129672.0	3602	36.00
1+200	155606.4	3602	43.20
1+300	77803.2	3602	21.60
1+400	64836.0	3602	18.00
1+500	103737.6	3602	28.80
1+600	64836.0	3602	18.00
1+700	129672.0	3602	36.00
1+800	104083.2	3614	28.80
1+900	65052.0	3614	18.00

2+000	52041.6	3614	14.40
2+100	39031.2	3614	10.80
2+200	39031.2	3614	10.80
2+300	27321.8	3614	7.56
2+400	26020.8	3614	7.20
2+500	39031.2	3614	10.80
2+600	182145.6	3614	50.40
2+700	143114.4	3614	39.60
2+800	104083.2	3614	28.80
2+900	97578.0	3614	27.00
3+000	91072.8	3614	25.20
3+100	71557.2	3614	19.80
3+200	52041.6	3614	14.40
3+300	39031.2	3614	10.80
3+400	39031.2	3614	10.80
3+500	26020.8	3614	7.20

3.6. Cálculo del porcentaje de renovación de aire

Para el cálculo del porcentaje de renovación de aire, utilizaremos la fórmula:

$$Tr_{\%} = \frac{Tr_1}{Tr_2} * 100 \quad (5)$$

Dónde:

$Tr_{\%}$: ----- Renovación de aire relativa (%)

Tr_1 : ----- Tasa de renovación del aire de cada progresiva (100m) del túnel de conducción (h^{-1})

Tr_2 : ----- Tasa de renovación del aire de referencial inicial (h^{-1})

Reemplazando los valores de la tasa de renovación de aire de cada progresiva del túnel de conducción y la tasa de renovación del aire de referencia inicial en la fórmula (5), se obtiene los resultados del porcentaje de renovación de aire relativa, en la tabla N° 14.

Tabla 13: Resultado del cálculo del porcentaje de renovación de aire relativa

Tramo	Q (m ³ /h)	V (m ³)	Tasa de renovación de aire (h ⁻¹)	Porcentaje de renovación de aire relativa
0+100	182145.6	3614	50.40	100%
0+200	130104.0	3614	36.00	71.43%
0+300	117093.6	3614	32.40	64.29%
0+400	156124.8	3614	43.20	85.71%
0+500	142639.2	3602	39.60	78.57%
0+600	129672.0	3602	36.00	71.43%
0+700	168573.6	3602	46.80	92.86%
0+800	155606.4	3602	43.20	85.71%
0+900	142639.2	3602	39.60	78.57%
1+000	142639.2	3602	39.60	78.57%
1+100	129672.0	3602	36.00	71.43%
1+200	155606.4	3602	43.20	85.71%
1+300	77803.2	3602	21.60	42.86%
1+400	64836.0	3602	18.00	35.71%
1+500	103737.6	3602	28.80	57.14%
1+600	64836.0	3602	18.00	35.71%
1+700	129672.0	3602	36.00	71.43%
1+800	104083.2	3614	28.80	57.14%
1+900	65052.0	3614	18.00	35.71%
2+000	52041.6	3614	14.40	28.57%
2+100	39031.2	3614	10.80	21.43%
2+200	39031.2	3614	10.80	21.43%
2+300	27321.8	3614	7.56	15.00%
2+400	26020.8	3614	7.20	14.29%
2+500	39031.2	3614	10.80	21.43%
2+600	182145.6	3614	50.40	100.00%
2+700	143114.4	3614	39.60	78.57%
2+800	104083.2	3614	28.80	57.14%
2+900	97578.0	3614	27.00	53.57%
3+000	91072.8	3614	25.20	50.00%
3+100	71557.2	3614	19.80	39.29%
3+200	52041.6	3614	14.40	28.57%
3+300	39031.2	3614	10.80	21.43%
3+400	39031.2	3614	10.80	21.43%
3+500	26020.8	3614	7.20	14.29%

En la Figura 14⁽⁸⁾ se presenta un gráfico de las mediciones de velocidad del aire realizadas a lo largo del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa, cabe mencionar las mediciones realizadas de velocidad del aire, corresponden en adición al ingreso natural de aire por diferencia de presiones desde la ventana N°02 y el sistema de ventilación existente en el túnel de conducción desde la ventana N°01.

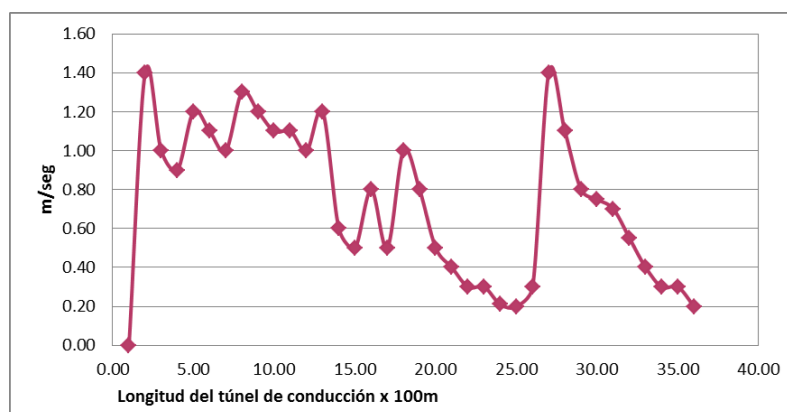


Figura 14: Velocidad del aire a lo largo del túnel de conducción

Fuente: Departamento de Prevención de Riesgos del Consorcio Rio Urubamba

En la Figura 15⁽⁸⁾ se presenta un gráfico del porcentaje de renovación de aire a lo largo del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.

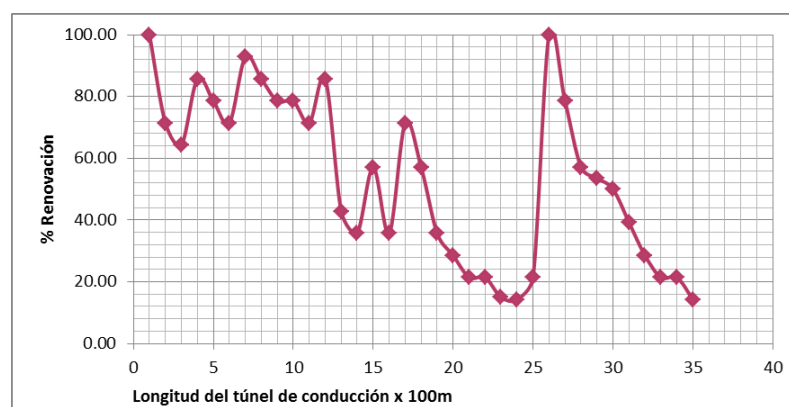


Figura 15: Porcentaje de renovación de aire a lo largo del túnel de conducción

Fuente: Departamento de Prevención de Riesgos del Consorcio Rio Urubamba

3.7. Cálculo de la exhalación y concentración de radón

1. Para el cálculo de la exhalación y la concentración de radón, utilizaremos las fórmulas, obtenidas en Bernard L. Cohen. "Concepts of nuclear physics". 1991:

$$F = C_{Ra} * \lambda_{Rn} * f * \rho * \left(\frac{D_c}{\lambda_{Rn} * (1 - \varepsilon)} \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$C = C_{Ra} * f * \rho \left(\frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} \right) \quad (7)$$

Dónde:

F: ----- Exhalación del radón (Bq.m².h⁻¹)

C: ----- Concentración del radón en el ambiente (Bq/m³)

V: ----- Volumen del recinto (m³)

λ_{Rn} : ----- Constante de desintegración del radón ($\lambda=0.0075536 \text{ h}^{-1}$)

A: ----- Área superficial del material de estudio (m²)

C_{Ra} : ----- Concentración de radio-226 (Bq/Kg)

f: ----- Coeficiente de emanación (%)

D_c : ----- Difusión del radón (m². s⁻¹)

ε : ----- Porosidad aparente (%)

ρ : ----- Densidad del material (Kg/m³)

3.7.1. Mediciones de densidad y porosidad aparente por tipo de roca.

Para este dato, se utilizaron las mediciones de las propiedades físicas de las muestras de roca del túnel de conducción, que se realizaron en mayo del 2009, en el departamento de ingeniería, sección de ingeniería de minas de la Universidad Católica del Perú, de acuerdo con la norma ASTM C97-02.

Tabla 14: Resultado de los ensayos de propiedades físicas para obtención de la densidad y porosidad aparente ⁽⁶⁾

Tipo de roca	Muestras	Densidad seca (gr/cm ³)	Densidad saturada (gr/cm ³)	Porosidad aparente (%)
M2	CHST-TC-M2	2.6	2.61	0.74
M3	CHST-TC-M3	2.60	2.61	0.85
M4	CHST-TC-M4	2.60	2.61	2.16

Tabla 15: Densidad y porosidad según tipo de roca ⁽⁶⁾

Tramo	Litología	Tipo de roca	Porosidad (%)	Densidad promedio (gr/cm ³)
0+000	Granodiorita	M3	0.85	2.6
0+100	Granodiorita	M4	2.16	2.6
0+200	Granodiorita	M3	0.85	2.6
0+300	Granodiorita	M4	2.16	2.6
0+400	Granodiorita	M2	0.74	2.6
0+500	Granodiorita	M2	0.74	2.6
0+600	Microdiorita	M4	2.16	2.3
0+700	Granodiorita	M3	0.85	2.6
0+800	Granodiorita	M3	0.85	2.6
0+900	Granodiorita	M3	0.85	2.6
1+000	Microdiorita	M3	0.85	2.3
1+100	Microdiorita	M3	0.85	2.3
1+200	Granodiorita	M3	0.85	2.6
1+300	Granodiorita	M3	0.85	2.6
1+400	Granodiorita	M3	0.85	2.6
1+500	Granodiorita	M3	0.85	2.6
1+600	Microdiorita	M3	0.85	2.3
1+700	Microdiorita	M3	0.85	2.3
1+800	Granodiorita	M3	0.85	2.6
1+900	Granodiorita	M2	0.74	2.6
2+000	Granodiorita	M2	0.74	2.6
2+100	Granodiorita	M3	0.85	2.6

2+200	Granodiorita	M3	0.85	2.6
2+300	Granodiorita	M3	0.85	2.6
2+400	Granodiorita	M3	0.85	2.6
2+500	Granodiorita	M4	2.16	2.6
2+600	Granodiorita	M3	0.85	2.6
2+700	Granodiorita	M2	0.74	2.6
2+800	Granodiorita	M3	0.85	2.6
2+900	Granodiorita	M3	0.85	2.6
3+000	Diorita	M3	0.85	2.3
3+100	Granodiorita / Microdiorita	M3	0.85	2.45
3+200	Microdiorita	M2	0.74	2.3
3+300	Granodiorita	M3	0.85	2.6
3+400	Granodiorita / Pizarra	M3	0.85	2.25
3+500	Microdiorita	M4	2.16	2.3

Reemplazando los valores de la concentración de Ra²²⁶ (62 Bq/Kg); obtenido de la fórmula 2, para el cálculo de la concentración de Ra226, la constante de desintegración del radón - λ_{Rn} de ($2.10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), su coeficiente de difusión - D_c ($1.20 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$) y los datos de densidad y porosidad aparente de la roca del túnel de conducción, de la tabla 16 y asumiendo un coeficiente de emanación (f) de 100%, en la fórmula (6), se obtendrán los resultados de exhalación de radón, en la tabla N° 17.

Reemplazando los valores de concentración de Ra²²⁶ (62 Bq/Kg); los datos de densidad y porosidad aparente de la roca granítica y asumiendo un coeficiente de emanación (f) de 100% en la fórmula (7), se obtendrán los resultados de concentración de radón, incluidos también en la tabla N°17

Cabe mencionar que para efectos del análisis de riesgo, sobre la tasa de exhalación y concentración de radón en el túnel de conducción, se está asumiendo el mayor coeficiente de emanación, para la simulación de las condiciones más desfavorables en materia de seguridad y estimar posteriormente las dosis de radiación absorbidas por los trabajadores.

A continuación se muestran los resultados de los cálculos de exhalación y concentración de Rn^{222} , considerando un coeficiente de emanación (f) de 100%

Tabla 16: Exhalación y concentración de Rn^{222}

Tramo	Porosidad (%)	Densidad promedio (Kg/m ³)	Exhalación Rn^{222} (Bq.m ² .s ⁻¹)	Concentración Rn^{222} (Bq/m ³)
0+000	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
0+100	2.16	2600	2.59E-01	3558.789861
0+200	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
0+300	2.16	2600	2.59E-01	3558.789861
0+400	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121
0+500	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121
0+600	2.16	2300	2.29E-01	3148.160262
0+700	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
0+800	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
0+900	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
1+000	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175
1+100	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175
1+200	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
1+300	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
1+400	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
1+500	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
1+600	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175
1+700	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175
1+800	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
1+900	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121
2+000	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121
2+100	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
2+200	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
2+300	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
2+400	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
2+500	2.16	2600	2.59E-01	3558.789861
2+600	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
2+700	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121
2+800	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
2+900	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
3+000	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175
3+100	0.85	2450	2.42E-01	1302.21886

3+200	0.74	2300	2.27E-01	1063.106992
3+300	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546
3+400	0.85	2250	2.22E-01	1195.91528
3+500	2.16	2300	2.29E-01	3148.160262

En la Figura 16⁽⁸⁾ se presenta un gráfico del concentración de radón a los largo del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa.

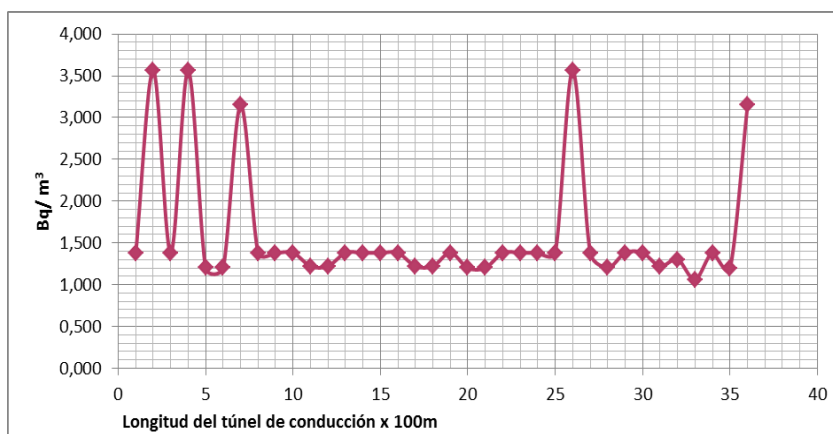


Figura 16: Concentración de radón a lo largo del túnel de conducción

Fuente: Departamento de Prevención de Riesgos del Consorcio Rio Urubamba

3.8. Cálculo de la dosis de radón

- Para el cálculo de la dosis de radón, se tendrá en cuenta el tiempo de exposición del trabajador por día en cada sector del túnel de conducción y se utilizará la fórmula, obtenida de Bernard L. Cohen. "Concepts of nuclear physics". 1991.

$$D = 4.91698 \times 10^{-6} * T * G * C \quad (8)$$

Dónde:

C: ----- Concentración del radón (Bq/m³)

T: ----- Horas de exposición mensual en un ambiente

G: ----- Factor de equilibrio

D: ----- Dosis (mSv/año)

Reemplazando los valores de la concentración de Rn^{222} , obtenido en la tabla N°17, asumiendo un valor factor de equilibrio (G) de 0.4 y el tiempo de exposición en horas por mes, en la fórmula 8, se obtiene los resultados de la dosis de radiación absorbida, en la tabla N° 18.

Tabla 17: Dosis de radón en túnel de conducción – f (100%)

Progresiva	Porosidad (%)	Densidad promedio (Kg/m ³)	Exhalación (Bq.m ² .s ⁻¹)	Concentración (Bq/Kg)	Dosis (mSV/a)
0+000	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
0+100	2.16	2600	2.59E-01	3558.789861	2.30980
0+200	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
0+300	2.16	2600	2.59E-01	3558.789861	2.30980
0+400	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121	0.78000
0+500	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121	0.78000
0+600	2.16	2300	2.29E-01	3148.160262	2.04329
0+700	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
0+800	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
0+900	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
1+000	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175	0.79345
1+100	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175	0.79345
1+200	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
1+300	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
1+400	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
1+500	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
1+600	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175	0.79345
1+700	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175	0.79345
1+800	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
1+900	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121	0.78000
2+000	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121	0.78000
2+100	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
2+200	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
2+300	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
2+400	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
2+500	2.16	2600	2.59E-01	3558.789861	2.30980
2+600	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
2+700	0.74	2600	2.57E-01	1201.773121	0.78000
2+800	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
2+900	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
3+000	0.85	2300	2.27E-01	1222.491175	0.79345

3+100	0.85	2450	2.42E-01	1302.21886	0.84519
3+200	0.74	2300	2.27E-01	1063.106992	0.69000
3+300	0.85	2600	2.57E-01	1381.946546	0.89694
3+400	0.85	2250	2.22E-01	1195.91528	0.77620
3+500	2.16	2300	2.29E-01	3148.160262	2.04329

3.9. Evaluación del riesgo de exposición al radón

Se realizarán los cálculos de dosis de radón, considerando coeficientes de emanación desde 70% hasta 100%, para mantener el análisis de riesgo en las condiciones más desfavorables para los trabajadores.

Considerando la dinámica de la ejecución de las obras subterráneas en el túnel de conducción y el movimiento de los trabajadores en ella, las dosis de radón calculadas en cada progresiva, serán promediadas para obtener una dosis final para cada coeficiente de emanación, esta dosis final será la que se evalúe de acuerdo al criterio del análisis del riesgo impuesto por la legislación.

Tabla 18: Dosis de radón promedio en túnel de conducción

Dosis de radón	Dosis de radón	Dosis de radón	Dosis de radón	Dosis requerida por la legislación
$f(100\%)$	$f(90\%)$	$f(80\%)$	$f(70\%)$	mSv/a
mSv/a	mSv/a	mSv/a	mSv/a	
1.03	0.93	0.83	0.72	≤ 1

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1. Considerando las condiciones de ventilación existentes en el túnel de conducción, los cálculos realizados sobre la dosis de radón a diferentes coeficientes de emanación (desde 70% a 100%), comportan una ausencia de riesgo. En todo el túnel se calculó una dosis estimada tomando en cuenta un promedio de la permanencia de los trabajadores en todos los sectores de trabajo, dichas dosis reflejan valores menores de 1mSv/año, que es el valor máximo regulado por la legislación que debe recibir el público expuesto a la radiación natural o artificial.

Como se muestra en la Figura 17⁽⁸⁾ que presenta la dosis de radón, calculada con un coeficiente de emanación del 100%, a lo largo del túnel de conducción, se observan 5 puntos específicos que sobrepasan el límite de dosis de radiación para trabajadores expuestos a radiación natural, no laboral, sin embargo, como promedio la dosis de radón se encuentra en el límite aceptable por la legislación, concluyendo que no hay riesgo por exposición a radón en el túnel de conducción.

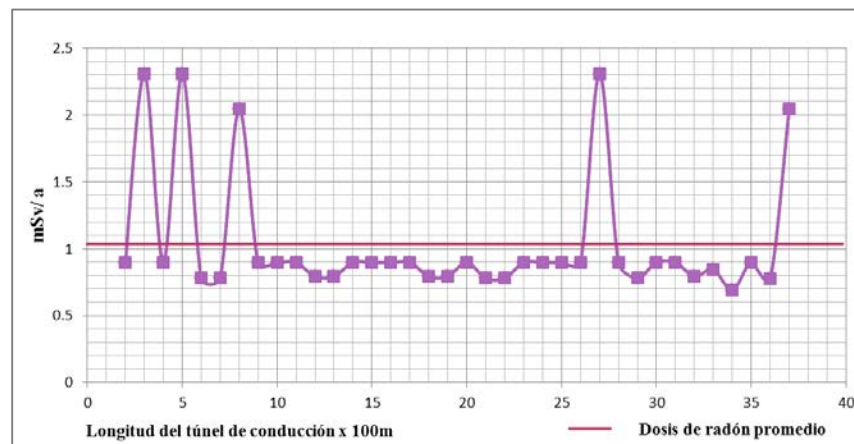


Figura 17: Dosis de radón en túnel de conducción y dosis de radón promedio

Fuente: Departamento de Prevención de Riesgos del Consorcio Rio Urubamba

2. La medición de las emisiones de radón en centros de trabajo y viviendas en un elemento clave para la reducción de los niveles de contaminación de los ambientes cerrados y prevención del desarrollo de cáncer pulmonar de sus habitantes.
3. En nuestro país y Latinoamérica, la legislación existente no especifica normas sobre los métodos de medición asociados al radón y su progenie radiactiva, así como la obligatoriedad de los estudios sobre la estimación de la tasa de exhalación de radón en la superficie para construcción de viviendas o edificaciones e información sobre la metodología para la investigación de las concentraciones de radón en viviendas y centros de trabajo existentes. En adición, las normas sobre enfermedades relacionadas al trabajo solo contemplan el cáncer pulmonar debido a la exposición al radón en actividades de minería subterránea y procesos productivos relacionados con el U^{238} , cuando la exposición a radón la podemos encontrar en diferentes condiciones laborales y no laborales en viviendas y centros de trabajo.
4. En el presente informe, considerando un incremento de 5ppm en el contenido de U^{238} en la roca granítica del túnel de conducción, produciría modificaciones en la dosis promedio de radón al doble de su valor con 2.07mSv/a, con un incremento de 10ppm en el contenido de U^{238} , la dosis calculada se elevaría a 3.11mSv/a, en ambas simulaciones sobre condiciones de trabajo con incremento del contenido de U^{238} presente en el suelo, el nivel de riesgo aumentaría por encima de los requerimientos legales y obligaría a tomar medidas de remediación en el lugar de trabajo, con un costo económico importante, en el presente caso, se trataría de la instalación de un sistema de ventilación adicional al existente para diluir la concentración de radón en el túnel a niveles de ausencia de riesgo.

5. De acuerdo con los estudios sobre caudal aire en el túnel de conducción (Figura 16) y los valores obtenidos de dosis de radón por encima de 1mSv/a (Tabla 19), se concluye que el sistema de ventilación existente en estos lugares con concentraciones superiores de radón no peligrosas, comporta fallas operacionales que deben ser revisadas de forma específica para su mejoramiento, mantenimiento y/o reparación.

Tabla 19: Progresivas del túnel de conducción con dosis de radón por encima de lo normado en la legislación > 1mSv/a

N°	Progresiva	Dosis (mSV/a)
1	0+100	2.30980
2	0+300	2.30980
3	0+600	2.04329
4	2+500	2.30980
5	3+500	2.04329

En adición, se presenta en la Figura 18⁽⁸⁾ el gráfico sobre el caudal de aire en el túnel de conducción, donde se observa la ubicación de los lugares con disminución de ventilación e incremento de la dosis de radón.

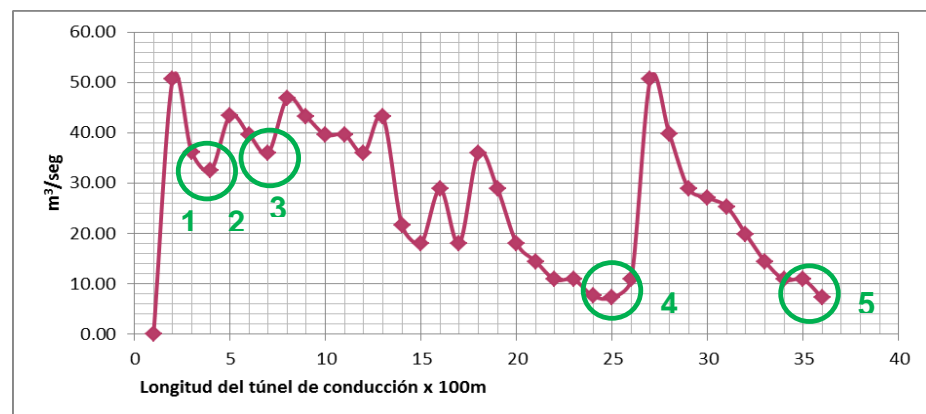


Figura 18: Ubicación de los lugares con disminución de la ventilación asociada al incremento de la dosis de radón en el túnel de conducción

Fuente: Departamento de Prevención de Riesgos del Consorcio Río Urubamba

4.2. Recomendaciones

1. Para la prevención del cáncer pulmonar y el aseguramiento de los niveles de contaminación en interior del túnel de conducción, ambientes cerrados en general de lugares de trabajo y viviendas, se debe implementar un sistema formal de medición de concentración de radón y su dosis efectiva en todas las organizaciones.
2. Las mediciones formales deben de ser aplicadas en base a una normativa legal específica que regule y fiscalice los medidas de seguridad para la reducción de la concentración de radón y su remediación y que defina los criterios radiológicos para la medición e investigación en lugares de trabajo y viviendas, como en nuestro país no tenemos tales leyes, debemos implementarlas a partir de las experiencias de la comunidad europea y los estados unidos.
3. Se puede implementar como una aplicación de ingeniería, el uso del radón para el monitoreo de aire fresco en los sistemas de ventilación en túneles y actividades subterráneas en general.

V. REFERENCIAS

1. Alvarez C., Hernández-Soto, A., Tello, S. “Manual de Evaluación del Riesgo”. Primera Edición. Pág. 25 2005.
2. Bernard L. Cohen. “Concepts of nuclear physics”. 1971.
3. Consejo de seguridad nuclear. Convenio sobre seguridad nuclear. “Sexto informe nacional”. Fecha de consulta: Agosto 2013. www.csn.es
4. Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Facultad de Física (UCM). “Introducción a la radiactividad”. 2002. <http://nuclear.fis.ucm.es.FERIA/FERIA2.html>
5. Departamento de Química Nuclear de la Universidad de Alcalá. “Manual de química nuclear”. Cap. 2. Pág. 23. 1994.
6. Departamento de Geología del Proyecto Central Hidroeléctrica Santa Teresa. “Clasificación de rocas en túnel de conducción y ensayos físicos de porosidad aparente y densidad de rocas”. Agosto 2013.
7. Departamento de Ingeniería del Proyecto Central Hidroeléctrica Santa Teresa. “Plano de ventilación y de ubicación del túnel de conducción”, “Esquema de planta de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa” y “ Vista de la ubicación de las ventanas de ingreso al túnel de conducción y las progresivas donde se realizaron las mediciones de los factores que influyen en la concentración de radón”. Agosto 2013.
8. Departamento de Prevención de Riesgos y Gestión Ambiental del Proyecto Central Hidroeléctrica Santa Teresa. “Registros de medición de velocidad del aire, humedad y temperatura”. Agosto 2013.

9. Dirección General de Salud Ambiental. DIGESA. “Manual de salud ocupacional”. Pág. 74. 2005.
10. Duque. E., G. “Manual de Geología para Ingenieros”. Universidad Nacional de Colombia. Cap. 10. Pág. 203. 2013.
11. Environmental Protection Agency. EPA. “Assesment of risk from radon in homes”. (EPA 402-R-03-003). 2008. www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html
12. Environmental Protection Agency. EPA. “Toxicological profile for radon”. 1990.
13. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de Construcción de la Central Hidroeléctrica Santa Teresa. Cap. 01. Págs. 1 y 3. 2011.
14. Huertas. C., Hueso. F. “Análisis de las desintegraciones de una fuente radiactiva: Ra²²⁶”. Facultad de Física. Universidad de Valencia. Abril 2008.
15. International Atomic Energy Agency. IAEA. “Safety Report N°33. Radiation protection against radon in workplace other than mines”. Viena. 2003.
16. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. “Ficha de seguridad química RADON”. Agosto 2013. www.insht.es
17. Organización Internacional de Energía Atómica. OIEA. “Colección seguridad N°115”. Viena 1997.
18. Rubio, Juan. “Métodos de evaluación de riesgos laborales”. Pág. 18. 2004
19. Sociedad Americana de Cáncer. “Tipos de cáncer asociados al radón”. Fecha de consulta: Agosto 2013. www.cancer.org/espanol/index