JOSE MANUEL OSORES REBAZA, NANCY MARIELA CHALLAPA VELASQUEZ, JORGE ANTONIO JACINTO MARTINEZ GASTELU, RAUL MIGUEL JARA MARTINEZ, JAVIER FELICIANO CHALLAPA VELÁSQUEZ

RADIOACTIVIDAD EN EL AIRE

UN ESTUDIO SOBRE EL IMPACTO DE YODO-131 EN LA COMUNIDAD DE HUARANGAL



IDEOs
Centro de Investigación y Producción Científica

Radioactividad en el Aire

Un Estudio sobre el Impacto de Yodo-131 en la Comunidad de Huarangal

Editor

IDEOs
Centro de Investigación
y Producción Científica

Radioactividad en el Aire
Un Estudio sobre el Impacto de Yodo-131 en la Comunidad de Huarangal

Jose Manuel Osores Rebaza, Nancy Mariela Challapa Velasquez, Jorge Antonio Jacinto Martinez Gastelu, Raul Miguel Jara Martinez, Javier Feliciano Challapa Velásquez

Editado por

CENTRO DE INVESTIGACIÓN & PRODUCCIÓNCIENTÍFICA IDEOS E.I.R.L

Dirección: Calle Teruel 292, Miraflores, Lima, Perú.

RUC:20606452153

Primera edición digital, Noviembre 2026

Libro electrónico disponible en
www.tecnohumanismo.online

ISBN: 978-612-5166-66-1

Registro de Depósito legal N°: **2026-15645**





Jose Manuel Osores Rebaza

https://orcid.org/0000-0002-3966-8839

josores@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

Nancy Mariela Challapa Velasquez

https://orcid.org/0000-0002-7878-8534

nchallapa@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

Jorge Antonio Jacinto Martinez Gastelu

https://orcid.org/0000-0002-3790-6549

jmartinez@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

Raul Miguel Jara Martinez

rjara@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

Javier Feliciano Challapa Velásquez

https://orcid.org/0009-0005-6774-5722

jchallapa@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

ÍNDICE

RESEÑA 5

INTRODUCCIÓN 7

CAPÍTULO I 10

1.1 Radioactividad en el aire: impacto del yodo-131 en la comunidad de Huarangal. 10

1.2. Radioyodo y metabolismo: primeras aproximaciones dosimétricas 11

1.3. Evidencia epidemiológica cerca de instalaciones nucleares 12

1.4. Liberaciones accidentales y transporte a larga distancia 12

1.5. Antecedentes peruanos y brecha de conocimiento 13

1.6. Síntesis y relevancia 13

CAPÍTULO II 14

2.1. Teorías generales 14

2.1.1. La Salud Rural en el Perú 14

2.1.2. El Cáncer en el Perú 15

2.1.3 Aplicaciones de las radiaciones ionizantes 16

2.1.4. Dispersión de contaminantes atmosféricos 16

2.2. Marco teórico 17

2.3. Marco conceptual 20

CAPÍTULO III 21

3.1. Objetivos 21

3.1.1. Objetivo General 21

3.1.2. Objetivos Específicos 21

3.2. Método 22

3.2.1. Tipo de estudio 22

3.2.2. Diseño de investigación 22

3.3. Hipótesis y prueba de hipótesis 22

3.4. Variables 23

3.5. Población y muestra 23

3.6. Técnicas de investigación 24

3.6.1. Instrumentos de recolección de datos 24

3.6.2. Procesamiento y análisis de datos 26

3.7. Resultados 29

3.7.1. Análisis e interpretación 29

3.7.2. Descargas de I-131 al medio ambiente 39

3.7.3. Estimación de la dosis por efluentes gaseosos 41

3.8. Discusión 47

CAPÍTULO IV 50

Conclusiones 50

Recomendaciones 51

REFERENCIAS 53

RESEÑA

Este libro es una valiosa y oportuna contribución al debate contemporáneo sobre los riesgos, usos y percepciones sociales en torno a la energía nuclear en el Perú. A través de una investigación rigurosa y multidisciplinaria, los autores abordan un tema poco explorado en el contexto nacional: el posible impacto sanitario y ambiental del yodo-131 —un isótopo radiactivo de uso médico— liberado por el Centro Nuclear RACSO, en la comunidad agrícola de Huarangal, ubicada dentro de su zona de influencia.

Con una prosa científica clara y accesible, la obra recorre el origen histórico y polémico de la energía nuclear, desde sus usos bélicos hasta sus aplicaciones pacíficas en medicina e investigación. En ese marco, se plantea una preocupación fundamental: si bien el Perú no cuenta con centrales nucleares de generación eléctrica, sí posee instalaciones que manipulan materiales radiactivos, cuyas implicancias en la salud pública aún no han sido suficientemente comprendidas ni divulgadas.

El texto expone con solidez conceptual y metodológica cómo se realizó el estudio del impacto potencial del yodo-131 sobre los habitantes de Huarangal entre los años 1990 y 2014. A través de técnicas de modelación atmosférica, estimación de dosis radiológicas y análisis de percepción social del riesgo, se identifican rutas de exposición, grupos vulnerables y escenarios posibles de afectación a la salud. El enfoque no se limita a lo técnico: también se explora la dimensión humana de vivir cotidianamente bajo la sombra de un centro nuclear, donde la incertidumbre, el desconocimiento y el temor configuran una vivencia compleja y persistente.

Uno de los mayores méritos del libro es su capacidad para conectar la evidencia científica con la necesidad urgente de fortalecer las políticas públicas de salud ambiental y la vigilancia radiológica en el país. En esa línea, no solo genera información útil para la toma de decisiones, sino que contribuye a reducir la brecha entre la ciencia y la ciudadanía. La investigación se convierte así en una herramienta ética y pedagógica, que busca empoderar a las comunidades con conocimiento y, al mismo tiempo, exigir mayor responsabilidad a las instituciones encargadas del control radiológico.

Finalmente, Radiactividad en el Aire no es solo un estudio técnico, sino también una reflexión profunda sobre cómo deben manejarse los riesgos tecnológicos en sociedades democráticas. Invita a pensar críticamente el desarrollo científico en relación con la justicia ambiental, la equidad sanitaria y el derecho ciudadano a vivir en un entorno seguro.

Es un libro imprescindible para científicos, autoridades, profesionales de salud, ambientalistas y ciudadanos interesados en comprender los riesgos invisibles que puede entrañar el uso de tecnologías nucleares. Una lectura que, sin duda, dejará huella y abrirá nuevas preguntas en la agenda pública nacional.

INTRODUCCIÓN

Desde que la humanidad logró liberar la energía contenida en el núcleo atómico, los usos de la energía nuclear han suscitado tanto admiración como temor. El descubrimiento de la fisión nuclear, lejos de abrir su historia con aplicaciones pacíficas, estuvo profundamente ligado al horror de la Segunda Guerra Mundial. La devastación causada por las bombas atómicas dejó una marca imborrable en la conciencia colectiva, generando hasta hoy una profunda desconfianza hacia esta tecnología. La asociación entre energía nuclear y conflicto armado ha sido un obstáculo persistente para su aceptación pública (ONU, 1987).

Sin embargo, con el paso de los años, la ciencia fue demostrando que la energía nuclear podía ofrecer mucho más que destrucción. El desarrollo de reactores de investigación abrió nuevas posibilidades, no solo en la generación de energía en países con escasas reservas fósiles, sino también en áreas como la medicina y la investigación científica. En particular, la disponibilidad de radionucleídos ha revolucionado el diagnóstico y tratamiento de numerosas enfermedades, permitiendo avances que de otro modo hubieran sido impensables.

Pese a ello, su uso no ha estado exento de controversia. En los campos de la biomedicina, por ejemplo, algunos científicos han mostrado reservas ante la incorporación de isótopos radiactivos como herramientas de investigación. Pero lo cierto es que muchos descubrimientos en biología molecular, genética y medicina nuclear no habrían sido posibles sin estas tecnologías.

Comprender el efecto de la radiación en los seres vivos ha sido uno de los grandes desafíos de la ciencia moderna. Hoy sabemos que la exposición a radiaciones ionizantes puede provocar daños genéticos y somáticos, desde mutaciones hereditarias hasta cáncer y otras enfermedades. La discusión científica actual se centra, entre otras cosas, en los efectos acumulativos de las dosis bajas de radiación, que siguen siendo objeto de intensos debates y estudios. Aunque se han establecido límites regulatorios, muchos expertos coinciden en que los riesgos, especialmente en exposiciones prolongadas, no pueden ser descartados.

En el Perú, el Centro Nuclear Oscar Miró Quesada de la Guerra (RACSO), ubicado al norte de Lima, alberga instalaciones clave como el reactor nuclear RP-10 y la Planta de Producción de Radioisótopos. Desde su fundación, este centro ha estado al servicio de la investigación científica, la producción de radioisótopos y la prestación de servicios tecnológicos. Sin embargo, como en toda instalación nuclear, su operación genera residuos y emisiones que pueden representar un riesgo ambiental si no se manejan adecuadamente.

Entre los subproductos generados destaca el yodo-131, un radionucleído ampliamente utilizado en medicina, pero potencialmente riesgoso si es liberado al ambiente sin control. La posibilidad de que este isótopo alcance a las poblaciones cercanas ha sido motivo de preocupación, particularmente para los habitantes del centro poblado de Huarangal, una comunidad agrícola ubicada en la zona de influencia directa del centro nuclear.

Este libro nace del interés por comprender hasta qué punto las actividades desarrolladas en RACSO podrían haber generado un impacto en la salud de los pobladores de Huarangal entre los años 1990 y 2014. Para ello, se emprendió una investigación que integró métodos de análisis ambiental, modelación de dispersiones atmosféricas, estimación de dosis acumuladas y evaluación de la percepción del riesgo en la población. Se identificaron las rutas de exposición más probables, se determinaron los grupos vulnerables y se analizó si existía una relación entre la presencia del centro nuclear y posibles efectos en la salud colectiva.

Estudios internacionales han demostrado que las exposiciones ocupacionales, los accidentes nucleares y la liberación de radionucleídos al ambiente están asociados a diversos riesgos para la salud. Ejemplos como el accidente de Chernóbil revelaron un aumento de casos de cáncer de tiroides en poblaciones expuestas (Alfaro y Vargas, 2005), mientras que organismos internacionales como la OMS y el OIEA han insistido en la importancia de contar con sistemas de vigilancia ambiental y evaluación permanente del riesgo.

La contaminación radiológica es una forma menos visible, pero no por ello menos peligrosa, de afectación ambiental. A diferencia de otros contaminantes más perceptibles,

las emisiones radiactivas pueden pasar desapercibidas durante años, acumulándose silenciosamente en los cuerpos y los ecosistemas. Este hecho pone de relieve la importancia de estudios epidemiológicos centrados en poblaciones expuestas a bajas dosis de radiación, ya que sus efectos tienden a manifestarse a largo plazo, y en muchas ocasiones son difíciles de atribuir directamente a una fuente concreta.

En este contexto, el presente trabajo busca aportar evidencia científica rigurosa que permita estimar el impacto radiosanitario de RACSO en sus zonas aledañas. Su relevancia es doble: por un lado, ofrece insumos clave para la política pública en salud ambiental; por otro, contribuye a despejar dudas legítimas en una población que convive diariamente con una tecnología de alto riesgo y que, muchas veces, desconoce tanto sus beneficios como sus posibles efectos adversos.

Además de su relevancia teórica y científica, esta investigación tiene implicancias sociales significativas. La energía nuclear —aunque no tiene en el Perú la magnitud de una central de potencia— sigue generando rechazo y temor en la opinión pública. Contar con estudios confiables sobre sus efectos es indispensable para garantizar una comunicación transparente, fortalecer los mecanismos de vigilancia ambiental y construir una relación de mayor confianza entre la ciencia y la ciudadanía.

En suma, este libro invita al lector a reflexionar sobre la coexistencia entre desarrollo tecnológico y salud pública. Nos recuerda que el progreso científico no está exento de riesgos, y que es responsabilidad colectiva —institucional, profesional y ciudadana— garantizar que esos riesgos sean conocidos, evaluados y, sobre todo, controlados.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1 Radioactividad en el aire: impacto del yodo-131 en la comunidad de Huarangal

Los avances que culminaron en la liberación controlada de la energía nuclear fueron protagonizados por figuras como Röntgen, Marie y Pierre Curie, Enrico Fermi o Niels Bohr. Aquellos descubrimientos, realizados con fines eminentemente científicos, terminaron cristalizando durante la Segunda Guerra Mundial en el Proyecto Manhattan. La fabricación y detonación de las primeras bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki (Gosling, 1999) marcó un parteaguas: la misma ciencia que impulsaba el progreso evidenció, de forma dramática, los riesgos que una liberación masiva de radionucleídos podía implicar para la salud humana y el ambiente. Este antecedente histórico explica por qué toda discusión contemporánea sobre radioactividad atmosférica—incluido el caso de Huarangal—debe equilibrar el potencial beneficioso de la tecnología nuclear con sus posibles efectos adversos.

Tras la guerra, el interés geopolítico se trasladó de la esfera militar al civil. La Unión Soviética inauguró en 1954 la primera central nucleoeléctrica en Obninsk, hito que desencadenó una carrera tecnológica en la que destacaron Francia, Gran Bretaña y, posteriormente, Estados Unidos (Jay, 1957). La rápida proliferación de reactores comerciales hizo latente la necesidad de comprender no solo la seguridad operativa, sino también las descargas rutinarias de radionucleídos, en especial radioyodos, al medio ambiente. La experiencia internacional de ese periodo constituye un espejo temprano que ayuda a dimensionar la relevancia de caracterizar, hoy, las emisiones procedentes de RACSO.

1.2. Radioyodo y metabolismo: primeras aproximaciones dosimétricas

Kaul y Roedler (1980) investigaron la biocinética del yodo radiactivo (I-131) y subrayaron que la ingesta puede ser hasta 1,7 veces mayor en poblaciones con deficiencia de yodo estable. Este hallazgo ilustra un elemento crítico para Huarangal: la dieta peruana, históricamente baja en yodo fuera de la franja costera, podría incrementar la captación tiroidea y, con ella, la dosis efectiva en la población rural. Por su parte, Oliver, Ballat y Manuel (1982) revelaron que el I-129 se bioacumula preferentemente en la leche, fenómeno clave para comunidades agroganaderas donde los lácteos son de consumo diario. Juntas, ambas investigaciones destacan el rol de la vía digestiva—particularmente la leche—como una ruta de exposición relevante que debe ser considerada en cualquier evaluación de riesgo local.

Nishizawa, Hamada y Sakuma (1983) monitorizaron trabajadores contaminados con I-131 mediante análisis de saliva, encontrando dosis tiroideas de 378-4 740 µGy. El estudio aportó evidencia práctica sobre la sensibilidad de métodos de monitoreo individuales y puso en contexto los potenciales niveles de exposición interna que pueden acumularse silenciosamente, aun cuando las emisiones externas sean bajas. Suman, Easterly y Baratta (1982) complementaron ese trabajo al validar la espectroscopía gamma para análisis de I-131, herramienta instrumental que hoy sustenta los protocolos de vigilancia ambiental en RACSO.

Muestreo y modelado de emisiones

Budyka y Ogorodnikov (1993) demostraron que la omisión de ciertas especies químicas de yodo en las muestras puede sobrestimar hasta cinco veces la dosis por inhalación. Su conclusión refuerza la necesidad de emplear filtros multipropósito y protocolos robustos en los puntos de monitoreo de Huarangal, donde las variaciones estacionales de temperatura y humedad pueden alterar la especiación química del yodo atmosférico.

El trabajo de Sobolev y Voigt (1996) tras el accidente de Chernóbil va un paso más allá: correlacionaron dosis tiroideas, lugar de residencia, ingesta de yodo estable y edad

para 49 360 habitantes de Pripiat. El enfoque integrado—combinar inhalación inicial con ingesta alimentaria posterior—es particularmente pertinente para nuestro caso de estudio, donde las prácticas agrícolas pueden convertir la deposición atmosférica en una fuente de exposición prolongada a través de cultivos de hortalizas y forrajes.

1.3. Evidencia epidemiológica cerca de instalaciones nucleares

Alonso et al. (2004) compararon la prevalencia de cáncer en zonas próximas a centrales nucleares de España con áreas rurales. Tras ajustar por edad, las tasas fueron mayores en medios urbanos. Aunque sus resultados sugieren que la mera proximidad geográfica no implica un aumento automático de riesgo, también revelan la necesidad de estudios locales detallados capaces de distinguir la carga cancerígena atribuible a factores socio-demográficos de la asociada a emisiones radiactivas.

Brenner et al. (2011) siguieron durante dos décadas a menores expuestos en Chernóbil y hallaron un exceso de riesgo relativo (ERR) por Gray de 1,91 para cáncer de tiroides. La persistencia de la respuesta dosis-efecto remarca que la vigilancia sanitaria en Huarangal no puede limitarse a medir niveles ambientales; requiere programas longitudinales que permitan detectar efectos diferidos.

1.4. Liberaciones accidentales y transporte a larga distancia

El terremoto y tsunami de Tohoku (2011) provocaron emisiones de 10^17 Bq de I-131 desde Fukushima (Akahane et al., 2012). Dicha pluma se detectó incluso en Cuba (Alonso et al., 2012), mientras que en el Perú no se identificaron concentraciones detectables (Osores y Jara, 2013). Este contraste muestra que la topografía andina y la dinámica atmosférica regional pueden atenuar la llegada de radionucleídos a larga distancia, pero no descartan impactos locales procedentes de fuentes puntuales como RACSO. La lección es doble: la dispersión puede atravesar fronteras, y la ausencia de detección remota no invalida la necesidad de control en el punto de origen.

1.5. Antecedentes peruanos y brecha de conocimiento

Los primeros ensayos de radiactividad ambiental en el Perú fueron realizados por Frisancho et al. (1962) y Jibaja et al. (1967), quienes ya identificaban I-131 en leche y hortalizas. Décadas después, Gonzales et al. (2001, 2002) detectaron I-131 en aerosoles del entorno de RACSO. Estas investigaciones locales confirman la presencia del radionucleído de interés y constituyen el punto de partida empírico para nuestro estudio. Sin embargo, falta todavía un análisis integrado que relacione concentraciones atmosféricas, rutas de exposición realistas y consecuencias para la salud comunitaria de Huarangal—vacío que el presente trabajo busca llenar.

1.6. Síntesis y relevancia

En conjunto, los antecedentes históricos, dosimétricos, metodológicos y epidemiológicos establecen tres premisas clave:

1. La captación de yodo radioactivo depende críticamente del estado nutricional de yodo estable y de los hábitos alimentarios—factores que en Huarangal requieren documentación específica
2. Las emisiones, aun dentro de límites regulatorios, pueden trasladarse al ser humano por inhalación directa o a través de la cadena alimentaria, lo que obliga a caracterizar tanto la atmósfera como los productos agrícolas locales.
3. Los efectos sobre la salud, particularmente cáncer de tiroides, pueden manifestarse décadas después, por lo que la vigilancia debe combinar mediciones ambientales y seguimiento epidemiológico a largo plazo.

Partiendo de estas premisas, nuestro estudio integra mediciones de I-131 en aire, modelado de dispersión, muestreo de alimentos y encuestas de salud, con el fin de ofrecer una evaluación holística del riesgo radio-sanitario en la comunidad de Huarangal. De este modo, la investigación enlaza la experiencia internacional con la realidad peruana, proporcionando evidencia necesaria para orientar políticas de vigilancia y proteger a una población que convive cotidianamente con la operación del centro nuclear RACSO.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Teorías generales

2.1.1. La Salud Rural en el Perú

El examen de los patrones de morbimortalidad muestra el claro predominio de las enfermedades transmisibles en los estratos rurales y de mayor pobreza. Existe una relación inversamente proporcional entre el nivel de concentración de la población y su estado de salud, es decir cuanto más concentrada esta la población sus niveles de salud son mayores y viceversa, cuanto más dispersa la población sus niveles de salud son peores, constituyendo poblaciones altamente vulnerable a enfermar y morir de enfermedades infecciosas: respiratorias agudas, enfermedades diarreicas agudas, tuberculosis o causas originadas en el período perinatal, o por complicaciones del embarazo, parto o puerperio, o enfermedades inmunoprevenibles, es decir infecto contagiosas y las complicaciones vinculadas al embarazo, parto y puerperio. Ello condiciona que aún se mantengan altas las tasas de mortalidad materna e infantil en las provincias donde se ubican estas poblaciones.

La tasa de mortalidad materna para estas poblaciones es aproximadamente de 190 x 10000 nacidos vivos, en algunas áreas de selva llega a ser de 600 x 10000 nacidos de vida y la Tasa de Mortalidad Perinatal es de 160 x 1 000 nacidos vivos. Esta situación se agudiza más aún en las zonas rurales, donde según Vallenas (2009), se encuentra aproximadamente el 64% de la población en extrema pobreza (tres millones de habitantes), muchas de cuales tienen crecimientos poblacionales negativos. Se tiene catalogada como población dispersa a tres millones ciento sesenta y seis mil habitantes, ubicados en ocho mil quinientos sesenta y seis centros poblados, es decir poblaciones con un promedio de 360 habitantes.

A pesar de que el mejoramiento de la salud en nuestro país se ha incrementado gracias a la implementación de diferentes programas de construcción, saneamiento y

educación, en donde muchos grupos de bajos recursos socioeconómicos han logrado mejorar sus indicadores de vida, todavía se puede observar que en las áreas rurales se mantienen vigentes las altas tasas de mortalidad en todos los niveles, especialmente en el grupo materno-infantil, debido principalmente a que estas poblaciones predominan el mayor grupo que se encuentra en pobreza extrema, falta de nivel cultural y carencia de servicios de salud y saneamiento.

2.1.2. El Cáncer en el Perú

Santisteban (2001) considera lo siguiente:

Elcáncer es una importante y cada vez mayor causa de morbilidad y mortalidad en el mundo; diez millones de casos nuevos son detectados cada año, y 6 millones de personas mueren por la enfermedad. Ocupa el segundo lugar como causa de defunciones en los Estados Unidos de Norteamérica y el mundo desarrollado, y el tercero en el Perú desplazado del segundo lugar por las enfermedades infecciosas y cardiovasculares (p. 1).

Si bien la ocurrencia de cáncer es un evento probabilístico en donde intervienen factores genéticos, ciertos estilos de vida y factores ambientales considerados “factores de riesgo”, van a incrementar esta probabilidad de ocurrencia. Entre los principales factores de riesgo se tienen el consumo de alcohol y tabaco, dietas no equilibradas, exposición a carcinógenos como asbesto, infecciones virales, obesidad, sedentarismo y exposición a radiaciones ionizantes.

Todos estos factores de riesgo, según sea el caso, pueden tener un comportamiento aditivo o sinérgico. La combinación de las acciones de los factores externos de riesgo con la edad y el propio componente genético de cada persona contribuyen al factor de riesgo individual. Todo esto trae como consecuencia para nuestro país una incidencia acumulada de 157 casos por cien mil habitantes y un promedio de cuarenta y cinco mil nuevos casos de cáncer diagnosticados por año según fuentes del Ministerio de Salud (Poquioma, 2005).

2.1.3 Aplicaciones de las radiaciones ionizantes

Los radioisótopos se utilizan como fuentes de radiaciones ionizantes o como átomos marcados para experimentos con trazadores.

En la actualidad, los radioisótopos constituyen un conjunto de herramientas tecnológicas utilizadas por el investigador científico, y equipos tales como contadores de centelleo, contadores Geiger y escalímetros, forman ahora parte del escenario normal de laboratorio en laboratorios universitarios, gubernamentales e industriales en casi todos los países. La variedad de radionúclidos coincide con la variedad de usos a los que se destinan al trabajo con trazadores.

Cuando se utilizan como fuentes de radiación, los radioisótopos se preparan generalmente en formas que se prestan a un manejo conveniente sin la oportunidad de contaminación ambiental en circunstancias normales. De este modo, el cobalto-60 en forma de fuente de rayos gamma se ha utilizado ampliamente para la irradiación de tejido canceroso y también como una fuente de radiación gamma para radiografía industrial.

Los radioisótopos como fuentes de rayos gamma también se utilizan para inducir cambios químicos y esterilizar alimentos, medicamentos y suministros médicos. Las fuentes de rayos gamma, en condiciones normales, no presentan un problema de contaminación ambiental, aunque es concebible que una fuente pueda quedar fuera de lugar o perdida y elevar el fondo de radiación gamma en su vecindad. Es bien sabido que el radio extraviado, en cantidades de miligramos, alguna vez se ha rastreado hasta en recipientes de basura, incineradores o vertederos de la ciudad. Los radioisótopos también se utilizan como fuentes de radiación interna en el tratamiento de ciertos tipos de cáncer. Por lo tanto, el yodo 131 en una dosis de aproximadamente 100 miliCuries se administra oralmente a pacientes que sufren de hipotiroidismo o cáncer de tiroides.

2.1.4. Dispersión de contaminantes atmosféricos

La liberación de contaminantes radiactivos en la atmósfera puede resultar en la inhabilitación del aire contaminado o, en condiciones extremas, en la exposición a la radiación gamma de una nube que pasa o de los radionucleidos depositados sobre las

superficies. La atmósfera también puede servir como medio de transporte desde la fuente de contaminación hasta el suelo y el agua.

La atmósfera contiene aerosoles naturales y artificiales que provienen de muchas fuentes. Además de los contaminantes atmosféricos introducidos como resultado de las actividades humanas, los meteoritos, la actividad volcánica, las tormentas de polvo, los incendios forestales y la oración oceánica se combinan para aportar grandes cantidades de sólidos suspendidos.

Cuando se introduce un vapor de gas o aerosol en la atmósfera, se diluye por difusión molecular o turbulenta. En la práctica, generalmente se puede olvidar la contribución de la difusión molecular en la que los coeficientes de difusividad son varios órdenes de magnitudes menores que los debidos a la difusión turbulenta.

La radiactividad total de la atmósfera consiste en las radioactividades de sus componentes, tanto en los estados gaseoso como en el líquido, siendo esta última constituida por aerosoles atmosféricos de diferente dispersión.

Los radionucleidos separados en diferentes estados agregados de la materia interactúan de manera diferente con los objetos del mundo circundante y difieren de otros tanto en sus propiedades como en su comportamiento en la atmósfera. Puesto que una generalización de las propiedades de los radionucleidos y su comportamiento en la atmósfera no puede dar una idea real de los radionucleidos separados, es necesario un cuidadoso estudio de los nucleídos específicos y de sus peculiaridades.

2.2. Marco teórico

Los isótopos de yodo pueden descargarse a la atmósfera como yodo molecular o como yoduros inorgánicos u orgánicos, dependiendo de su origen y de las condiciones que prevalecen en el sistema. El yodo molecular puede adsorberse en partículas submicrométricas durante o después de su descarga a la atmósfera.

Todas las formas están sujetas a dispersión en la atmósfera por procesos naturales de turbulencia, convección debida a la energía solar y otros calentamientos, movimiento

por el viento, etc. Tras la dispersión y la deposición, respectivamente, el yodo radioactivo puede ser inhalado e ingerido por el público.

El camino crítico que implica la ingestión puede sera través de laleche de vaca en las zonas productoras de leche en climas como el nuestro, o mediante el consumo de hortalizas en zonas en los que se consume poca leche. El camino crítico que implica la inhalación puede aplicarse en áreas desérticas y en otros sitios donde la agricultura no se practica extensamente. En este último caso, el grupo crítico puede ser un trabajador ocupacional en el lugar de trabajo.

En las zonas productoras de leche podría ser en el primer año de vida. Todas las dosis límite de radiación en el contexto del funcionamiento normal se expresan como límites anuales.

En el caso de descargas accidentales de yodo radioactivo, las incorporaciones y las dosis son de corta duración, en comparación con la escala de tiempo apropiada para las liberaciones controladas. El control de los peligros por inhalación e ingestión depende de la disponibilidad y aplicación de contramedidas.

Además de los efectos que se hacen evidentes inmediatamente después de una intensa irradiación, algunas de las consecuencias pueden no aparecer durante muchos años. Algunos de los efectos retardados resultan de una exposición aguda, mientras que otros son importantes cuando la dosis se administra en pequeñas exposiciones repetidas durante un largo período de tiempo. Estos efectos que se manifiestan en el individuo expuesto pueden ser referidos como efectos somáticos para diferenciarlos de los efectos genéticos que se observan en la descendencia de la persona expuesta.

La inhalación del aire que contiene un gas o polvo radiactivo resultará en la exposición del tracto respiratorio a la radiación ionizante. La alta incidencia de cáncer de pulmón, que se encontró por primera vez entre los mineros de Checoslovaquia, se ha atribuido a su exposición a la radiactividad atmosférica. Esta experiencia y la evidencia experimental de la capacidad de las sustancias radiactivas en el pulmón para causar cáncer han dado lugar a una considerable atención a los métodos de protección de los empleados expuestos a la contaminación atmosférica radiactiva.

Además, a veces es necesario tomar medidas para proteger al público (MEM, 1997), aunque la cantidad de radioactividad que se puede liberar con seguridad a la atmósfera general está en la mayoría de los casos limitada por los riesgos directos o indirectos a la radiactividad que se establece en la atmósfera, más que la fracción que permanece suspendida y que puede ser inhalada por los seres humanos.

La capacidad del pulmón para concentrar partículas aumenta los riesgos relativos de inhalación de sustancias radiactivas en forma de aerosoles en comparación con el riesgo de inhalar un gas radiactivo.

El tracto respiratorio está diseñado para transportar el aire hacia los alvéolos localizados profundamente en el pulmón donde se produce el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono entre la sangre y el aire. Gran parte del polvo contenido en el aire inhalado se elimina antes de que se alcancen los alvéolos, dependiendo la fracción exacta principalmente del tamaño y la densidad de las partículas.

La deposición dentro del tracto respiratorio ocurre por impacto inercial, sedimentación o movimiento browniano en el caso de partículas de menos de aproximadamente 0,1 micras de diámetro. Si el polvo es muy soluble, será rápidamente absorbido del tracto respiratorio en la sangre por medio del cual pasará a otros órganos del cuerpo. La exposición al polvo soluble no suele constituir un peligro para los pulmones.

La dosis recibida por las diferentes partes de los pulmones de un individuo inhalando polvo radiactivo depende por lo tanto de la concentración de radionúclido en el aire inhalado, de las propiedades físicas de los radionúclidos, de la velocidad de inhalación del polvo, de la región del pulmón En la que se deposita el polvo, y la velocidad a la que se retira. Estos últimos factores dependen del tamaño y densidad de las partículas, así como de factores fisiológicos que probablemente varían con los individuos.

La tiroides es un órgano que debe ser considerado especialmente debido a su tendencia a concentrar yodo. Cuando los productos de fisión o activación son liberados a la atmósfera, la dosis al tiroides puede ser el factor limitante en la determinación de la cantidad de tiempo que se puede permitir que un individuo permanezca en un área dada.

Lewis (1959) sugiere que bajo el supuesto de que existe una relación lineal entre la dosis de tiroides y la incidencia de cáncer de tiroides, se esperaría que una dosis de 1 rad entregada a la tiroides de un millón de bebés produjera de 10 a 100 casos de cáncer de tiroides durante los primeros 20 años de su vida.

2.3. Marco conceptual

Para el caso de actividades rutinarias, es importante que la exposición de la población sea tan baja como razonablemente sea posible y que se cumplan con las normativas nacionales establecidas por la Autoridad Reguladora.

Con respecto a la dispersión atmosférica de los materiales radiactivos, se debe realizar una descripción meteorológica de la región, incluso descripciones de parámetros meteorológicos básicos, orografía regional y fenómenos tales como velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, precipitación, humedad, parámetros de estabilidad atmosférica e inversiones prolongadas.

Además, se debe elaborar un programa de mediciones meteorológicas, que se llevará a cabo en el emplazamiento o cerca de él con el uso de instrumentación capaz de medir y registrar los principales parámetros meteorológicos en elevaciones y lugares apropiados.

En función de los datos obtenidos de la investigación de la región, es factible evaluar la dispersión de los materiales radiactivos emitidos con el empleo de modelos apropiados que incluyen todos los elementos topográficos importantes específicos del emplazamiento y de la región, así como las características de la instalación que puedan incidir en la dispersión atmosférica.

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo General

La investigación que se llevó a cabo pretende conocer en qué medida se presenta el impacto radiológico de las descargas atmosféricas producidas en la población de Huarangal, ubicada en el valle del río Chillón, Lima, entre los años 1990 y 2014, mediante la estimación de la dosis individual y la dosis colectivas, bajo condiciones rutinarias de operación del Centro Nuclear Oscar Miró Quesada de la Guerra "RACSO".

3.1.2. Objetivos Específicos

- Determinación de los niveles de radiactividad artificial debido a la presencia de I-131 en aire.
- Estimación de las descargas de I-131 por las instalaciones relevantes.
- Caracterización de la población objeto de estudio a fin de estimar el grado de radiosensibilidad de los grupos poblacionales presentes en el centro poblado Huarangal.
- Estimar el impacto radiológico en los habitantes del centro poblado Huarangal mediante el cálculo de dosis individual y dosis poblacional.
- Identificar la influencia en la salud humana mediante la estimación de los índices de riesgo en la población crítica.
- Proponer medidas de mitigación de contaminación radiactiva en situaciones de contingencia y descargas accidentales de elementos radiactivos al medio ambiente.

3.2. Método

3.2.1. Tipo de estudio

Se realizó un estudio descriptivo de tipo ecológico en donde se describen las propiedades más importantes del problema con la finalidad de evaluar probables factores de riesgo (Szklo y Nieto, 2003). Este estudio consistió en la recopilación de datos poblacionales y ambientales en función del tiempo. De esta manera, con todos estos datos es posible correlacionar el impacto radiosanitario y ocurrencia de enfermedades que se puedan presentar en la población.

3.2.2. Diseño de investigación

Se utilizó el método longitudinal con la finalidad de investigar un mismo grupo de personas durante un periodo de tiempo.

3.3. Hipótesis y prueba de hipótesis

La hipótesis de investigación seleccionada corresponde al tipo de hipótesis descriptiva, en donde se describe una situación relacional entre las variables que se someten al estudio (Córdoba, 2004). Por lo tanto, la hipótesis de la investigación se expresa de la siguiente manera: La dosis poblacional acumulada en el centro poblado "Huarangal" se incrementa proporcionalmente desde el inicio de operaciones del Centro Nuclear "RACSO"

La estrategia utilizada para verificar la hipótesis planteada consistió en la evaluación de los niveles de I-131 presentes en aire durante el periodo de estudio, la existencia de estos niveles significa que la población comprometida está recibiendo un impacto radiológico expresado en un incremento de dosis debida a incorporación de este radionucleído en su organismo.

3.4. Variables

Las unidades de análisis consideradas en la investigación son los niveles de radiactividad en aire y los habitantes del centro poblado Huarangal. Los atributos o características de las unidades de análisis que serán sometidas a medición se clasifican de la siguiente manera:

Variables	Tipo	Detalle	
Independientes	Continuas	**Concentración de I-131 en aire**	
	Categóricas	Dicotómicas	**Sexo**
		Policotómicas	**Edad, ocupación**
Dependientes	Continuas	**Descargas de I-131 al ambiente**	
		Dosis individual acumulada	
		Dosis poblacional acumulada	
	Categóricas	**Dicotómicas**	**Impacto radiosanitario**

3.5. Población y muestra

La población objeto de estudio comprende a todos los habitantes del centro poblado Huarangal, ubicado en el Distrito de Carabayllo, el total de la población es de aproximadamente 200 habitantes al inicio del estudio.

Para calcular el tamaño de la muestra se utilizó la siguiente ecuación (Moore, 2000):

$$n = \frac{S^2}{\frac{e^2}{Z^2_{\propto/2}} + \frac{S^2}{N-1}}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra. N = Tamaño de la población.

S2 = Varianza de la población que, debido al pequeño tamaño de la población, será igual a 1.

$Z_{\alpha/2}$ = Valor obtenido mediante niveles de confianza en relación al 95% de confianza equivalente a 1,96

e = Límite aceptable de error muestral que, valor que queda a criterio del encuestador.

Así, en base a la población estudiada, el tamaño de la muestra queda definido como sigue:

$$n=\frac{1^2}{\frac{0{,}1^2}{1{,}96}+\frac{1^2}{200-1}}=131\ habitantes$$

En total se evaluó el impacto en la salud debido al incremento de dosis en 131 habitantes del centro poblado de Huarangal.

3.6. Técnicas de investigación

3.6.1. Instrumentos de recolección de datos.

Muestreador de aerosoles: Para llevar a cabo el monitoreo de las descargas al ambiente por parte de las instalaciones radiactivas del centro nuclear, se realizaron colectas de aire con un muestreador de aerosoles marca Merlín-Gerín, modelo APA 300, con un flujo de aspiración promedio de 3,32 □ 0,04 metros cúbicos por hora. Este equipo de muestreo se ubicó a una distancia de 20 metros en dirección norte de la chimenea de la PPR (Figura N° 1), como colectores de partículas de polvo en aire se utilizaron filtros de planos de acetato de celulosa y para colectar los radioyodos en aire se utilizaron cartuchos con carbón activado MG modelo 8507 ref. 12217, con eficiencia de retención de yodo en aerosoles del 85% □ 5% según datos del fabricante.



Figura N° 1. Chimenea de la PPR

Sistema de espectrometría gamma: El material colectado fue analizado por instrumentación nuclear, utilizando un sistema de espectroscopia gamma de alta resolución compuesto por un detector semiconductor de germanio hiperpuro marca Canberra, modelo 7229P, ubicado en el interior de un blindaje de plomo de cinco centímetros de espesor y revestido internamente de bronce y cadmio. Este detector está conectado a una cadena electrónica que amplifica los pulsos nucleares y se procesan en una tarjeta electrónica multicanal asociada a una computadora compatible.

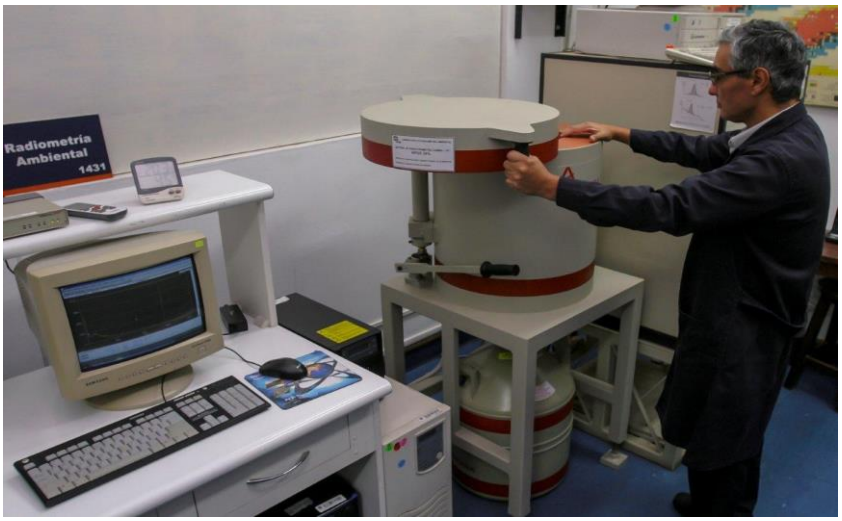

Figura N° 2. Sistema de Espectrometría Gamma

Información básica relevante: Para los alcances de esta tesis, la información básica relevante describe el estado inicial del medio ambiente en un área específica como es la zona de influencia del centro nuclear RACSO.Esta información incluye a los componentes ambientales que podrían ser afectados por las instalaciones del centro nuclear y que podrían influir sobre la salud y el ambiente. Los principales temas incluidos en esta información se enmarcan en los siguientes medios:

- Medio Físico: Aire, suelo, agua, paisajes, variables meteorológicas.
- Medio Biótico: Flora y Fauna.
- Medio Socioeconómico: Características sociodemográficas y de vivienda, usos del territorio, aspectos culturales, infraestructura.

La información relevante del medio físico y biótico se tomó de los estudios realizados durante la etapa pre-operacional del proyecto en la zona de emplazamiento del Centro Nuclear de Investigaciones del Perú (IPEN-CNEA, 1981) y de las observaciones in situ realizadas en la zona. La información meteorológica sobre velocidad y dirección de vientos fue colectada a partir de las planillas de la Estación Meteorológica de Huarangal y de los registros de la Estación Automática Weather Link la cual fue instalada en 1999 (Osores, 2006).

Con respecto al medio socioeconómico, se tomó como base la información proporcionada por el IX Censo de Población y Vivienda de 1993, desarrollado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI); estos datos fueron complementados por observaciones in situ y entrevistas personalizadas con los habitantes del centro poblado Huarangal. La información colectada consistió en el registro de datos demográficos, de salud, educativo, laboral, social y de vivienda. Con la información obtenida y utilizando las estimaciones de crecimiento demográfico del INEI así como las observaciones in situ, se elaboraron las tablas demográficas del año 1990 al 2014.

3.6.2. Procesamiento y análisis de datos

Tabulación de datos: Los datos obtenidos fueron tabulados utilizando hojas electrónicas de cálculo Excel; los datos de la concentración de radiactividad en aire fueron agrupados en series de tiempo mensuales. Los datos sobre la edad de la población estudiada se agruparon según los modelos del OIEA para su evaluación y estimación de

dosis. Los datos referentes a la información básica relevante fueron tabulados en función de sus características para luego ser procesados en los estudios de impacto ambiental y elaboración de modelos epidemiológicos (Consejo de Seguridad Nuclear – CSN, 2009).

Concentración de I-131 en aire: La concentración de actividad de I-131 se expresa en Bequerelios por metro cúbico de aire, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$AES = \frac{\frac{CTM}{TCM} - \frac{CTF}{TCF}}{EF \times EG \times DEC \times W}$$

Donde:

AES = Actividad especifica del radionucleído que se investiga en la muestra colectada, expresada en Bq/m^3.
CTM = Cuentas totales de la muestra colectada.
TCM = Tiempo de recuento de la muestra colectada expresado en segundos.
CTF = Cuentas totales del fondo instrumental.
TCF = Tiempo de recuento del fondo instrumental expresado en segundos.
EFI = Eficiencia instrumental del radionucleído investigado (Bq^{-1})
EG = Probabilidad de emisión gamma del radionucleído investigado, para el caso del I-131, su probabilidad de emisión gamma es 0,816.
DEC = Decaimiento del radionucleído desde la fecha de colecta de la muestra hasta la fecha del ensayo analítico, se calcula de acuerdo a la fórmula: $e^{(TT.\lambda)}$. Donde TT es el tiempo transcurrido desde la fecha de colecta hasta la fecha de ensayo en días y λ es la constante de decaimiento ($días^{-1}$) que para el caso del I-131 es 0,086398.
W = Volumen colectado en la muestra, expresado en metros cúbicos.

El tiempo promedio de lectura instrumental fue de 4000 segundos para cada cartucho de carbón activado colectado, dado que este tiempo de lectura es menor al 1% del tiempo de vida media del I-131 (8,021 días equivale a 693014 segundos) no es necesario realizar los ajustes por decaimiento radiactivo.

Evaluación ambiental: Una vez determinada la concentración de I-131 presente en aire por efecto de las descargas de las chimeneas del Centro Nuclear, es necesario conocer las características del medio ambiente en donde se dispersará el contaminante

radiactivo.En este sentido, con la información básica relevante respecto a los medios físicos y bióticos, se procedió a elaborar una tabla de evaluación ambiental orientada a identificar las principales vías de distribución de este radionucleído en el ecosistema estudiado hasta el centro poblado que estaría más afectado por estas descargas.

Considerando a las descargas atmosféricas como las principales fuentes de contaminación por parte del Centro Nuclear, se llevó a cabo la evaluación de la dispersión local utilizando el modelo gaussiano, tal como propone el OIEA (1986).Este modelo considera que la superficie terrestre es homogénea, que tanto el viento como la intensidad de la turbulencia no varían con el tiempo y que este radionucleído no sufre transformaciones químicas ni se deposita sobre el terreno.

Dosis individual: Es la medida de la radiación que recibe o absorbe cada persona y para efectos del presente estudio se estimó a partir de los niveles de I-131 en aire mediante la siguiente fórmula:

H

DI = Aa x Tr x Te x Fc

Donde:

DI	=	Dosis individual expresada en Sievert (Sv).
A_A	=	Actividad de I-131 presente en aire (Bequerelios/m^3).
T_R	=	Tasa de respiración de la persona por grupo ocupacional o de edad (m^3/día).
T_E	=	Tiempo de exposición de la persona expresado en fracción de día de acuerdo a sus actividades rutinarias (campo o casa).
F_C	=	Factor de conversión de dosis por inhalación de I-131, según tablas del OIEA.

Dosis efectiva colectiva: Es la dosis efectiva total de una población, fue calculada a partir de los datos de dosis individual para cada subgrupo mediante la siguiente fórmula:

DC = DI x GP

Donde:

DI = Dosis individual expresada en Sievert (Sv).

DC = Dosis colectiva expresada en Sievert-hombre para cada grupo de edad.

GP = Número de personas que componen el grupo poblacional estudiado.

Estimación del impacto radioepidemiológico: Con la aplicación del modelo de dispersión atmosférica, y con los datos obtenidos del sistema de muestreo de aire, se estimaron las descargas por parte de las instalaciones, del I-131 al ambiente así como su concentración en el centro poblado de Huarangal, ubicado en dirección de los vientos predominantes. La información obtenida fue correlacionada con los datos demográficos de este centro poblado a fin de estimar el impacto radiológico durante el tiempo de operación del Centro Nuclear mediante el cálculo de las dosis individuales y colectivas acumuladas con la finalidad de evaluar la conveniencia de realizar medidas de mitigación debido a los efectos de las radiaciones ionizantes en esta población.

3.7. Resultados

Dado que la hipótesis de la investigación indica que la población de Huarangal recibirá un incremento de dosis debido a las actividades del Centro Nuclear "RACSO", ésta se contrasta con los resultados obtenidos de la dosis individual y colectiva del centro poblado durante el período de duración del estudio.

3.7.1. Análisis e interpretación

3.7.1.1. Características naturales de la zona.

La zona del Centro Nuclear RACSO presenta una superficie aproximada de 125 hectáreas se encuentra ubicado en la llanura de un valle de orientación Nor-Este a Sur-Oeste; muy próximo a dos quebradas, una en dirección Norte y la otra Nor-Oeste. La base del valle tiene unos 10 Km. de ancho y presenta un declive del 5% en dirección Sur-Oeste.

El lugar del emplazamiento está rodeado de colinas de hasta 1500 metros de altura, excepto en la dirección Este, que corresponde a la zona agrícola del valle del río Chillón, ubicada a 15 km. de distancia.



Figura N° 3. Lugar de emplazamiento del Centro Nuclear "RACSO"

El suelo del lugar es arenoso y pedregoso, cubierto por una vegetación rala del tipo tillandsial. El tramo más importante en el cauce del río Chillón que debe ser monitoreado tiene una longitud aproximada de 18 Km. Esta parte del río está comprendida dentro del área de posibles impactos directos sobre los recursos de flora y fauna propios del río.

Los árboles son prácticamente inexistentes, excepto algunos ejemplares de sauce y huarango, los arbustos están representados por dos especies predominantes que son Tessariaintegrifolia "pájaro bobo", especie americana que ocupa las áreas más húmedas y Baccharislanceolata "chilco", también especie americana que en las áreas secas e islotes puede predominar sobre la primera.

Estas especies son refugio de diversas aves; como recurso natural se emplea el pájaro bobo para construcciones rústicas y el chilco como leña (IPEN-CNEA, 1981). En los últimos diez años se ha verificado la sistemática eliminación de estas especies debido a que los agricultores de la zona han expandido sus áreas de cultivo, por lo que muchas de las especies de flora y fauna identificadas a inicios de este estudio ya no se encuentran en la región.

Entre las herbáceas más destacadas se tienen el Poligonumaviculare "pimienta de agua", Rumexcrispus "lengua de vaca", Nasturiumofficinalis "berro",

Hidrocotylevulgaris “sombrerito de abad” entre otras. Esta vegetación herbácea se encuentra dispersa a lo largo del cauce y no se ha determinado sus consumidores permanentes, siendo pasto frecuente de vacunos y caprinos que pastorean el área en época de estiaje.

La relación entre estos productores primarios con la fauna terrestre y acuática es través de aves e insectos, los primeros con el consumo de semillas y los otros directamente con el follaje. La fauna presente en la zona es escasa, se observaron insectos como avispas, libélulas y coleópteros.

El área puede ser considerada como un ecosistema fuertemente intervenido o disturbado con respecto a su estado natural. Sus componentes son variados y variables tanto en cantidad como en calidad; así, las aguas por su forma y aprovechamiento y por su irregularidad de su volumen determinan hábitats con diferentes características físicas.

Respecto al componente climatológico, la región de Huarangal se encuentra ubicada dentro de la faja costera desértica denominada también “zona de Lomas” la cual depende de tres aspectos.

- La orientación del litoral y del Valle.
- El efecto de la barrera presentada por los Andes.
- La presencia del Anticiclón del Pacífico Sur.

La parte oriental de este Anticiclón se caracteriza por una inversión térmica, donde los vientos alisios del SE, se divergen en las capas bajas, asociados con la subsidencia en las capas altas de la troposfera media.La capa de inversión térmica, limita cualquier movimiento vertical permitiendo así la formación de nubes en niveles por debajo de la base de inversión. En invierno, la inversión térmica es intensa, mientras que en verano su intensidad disminuye debido a que el anticiclón se desplaza hacia el Sur, debilitándose los alisios del Sur-Este.

Huarangal posee bastante humedad que está concentrada en las primeras capas adyacentes al suelo, originando nubes estratiformes que cubren toda la zona, especialmente en invierno, mientras que en verano se cuenta con cielos claros y alguna presencia de pequeños cúmulos. Teniendo en cuenta el tipo de nubosidad dominante en

Huarangal, la precipitación que se observa es del tipo lloviznas que ocurren esporádicamente en invierno, por lo que cuando se toman los promedios mensuales multianuales se considera el mencionado lugar como zona desértica.

A pesar de la cercanía de Huarangal al océano (20 Km.), por las características topográficas que presenta el lugar de emplazamiento, éste no es afectado por los cambios de circulación debido a brisas de mar y tierra.



Figura N° 4. Estación meteorológica

Las variables meteorológicas, colectadas por la estación meteorológica durante el periodo de estudio, presentan las siguientes características: respecto al viento, se observa que los sectores SO, SSO y S totalizan un porcentaje importante de los casos, lo cual define un cuadrante dominante hacia el NE. La persistencia del viento en el resto de los sectores es despreciable frente a la persistencia de los tres anteriores. Si bien la calma y la variabilidad tienen un porcentaje importante, su presencia máxima media no supera las 4 horas.

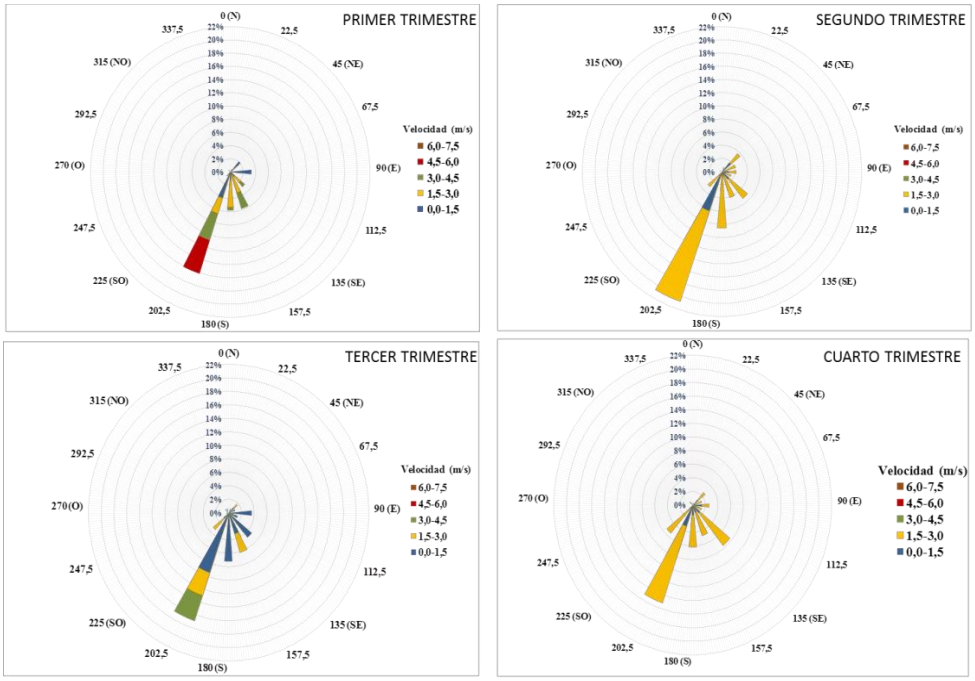

Figura N° 5. Rosa de vientos – Periodo 1999 - 2014

La rosa de vientos elaborada con los registros meteorológicos mostró que las mayores velocidades del viento se presentan en el primer y tercer trimestre de cada año y que en más del 90% de los registros la dirección del viento se mantiene en Sur-Sur-Oeste (SSO) y en menor grado las direcciones S y SSE.

La temperatura promedio anual fue de 20,2 °C; la temperatura promedio osciló entre 12,0 °C y 28,0 °C o sea una amplitud media anual de casi 16,0 °C.

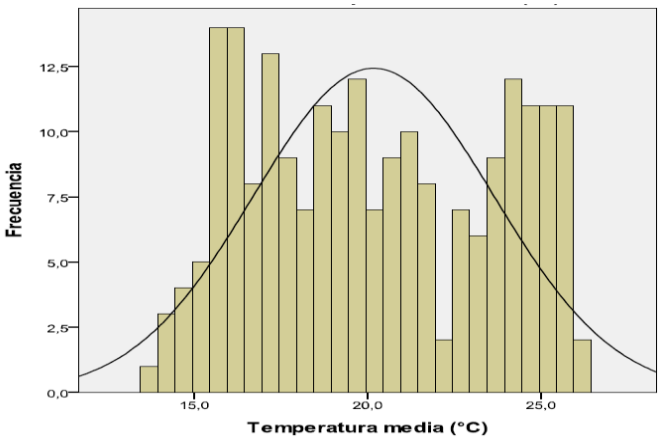

Figura N° 6. Temperatura media anual

La humedad relativa alcanza valores muy altos siendo su promedio mensual siempre superior al 75%. Si bien en el lugar es típica la presencia de nubes estratiformes a baja altura las cuales dan lugar a precipitación, estando constituida por gotas pequeñas y en poca cantidad que no superan la sensibilidad del pluviógrafo.

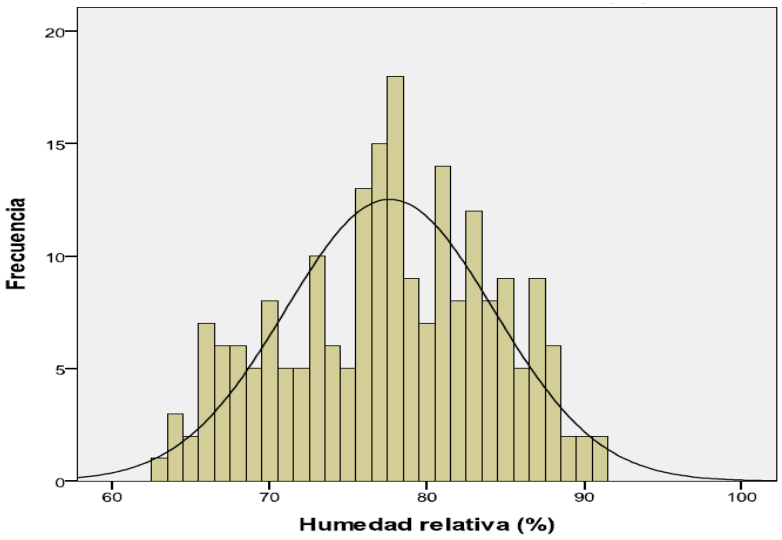

Figura N° 7. Humedad relativa anual

En cuanto al río Chillón, que es el recurso hidrológico más importante de la zona, se origina en la laguna de Chonta, a 4440 msnm, tiene una cuenca de 2350 km2, con una pendiente que varía del 6% al 2%. En su recorrido recibe aportes de ocho pequeños ríos en su margen derecha y dos en su margen izquierda. Así mismo, en la cuenca se encuentra hasta 3 lagunas de importancia cuya capacidad de almacenamiento varía entre tres y nueve millones de metros cúbicos.

La actividad predominante en el valle del río Chillón es la agricultura, con 11000 hectáreas las cuales utilizan mayormente el agua superficial. En el caso del Centro Nuclear RACSO, se usa el agua subterránea para uso doméstico e industrial.

El acuífero existente en el valle del río Chillón es de tipo libre y está contenida en depósitos aluviales. El sentido del flujo subterráneo es de NE a SO, con una gradiente que varía de 1,2% a 2,0%.

3.7.1.2. Características sociales y económicas.

Este centro poblado (Figura N° 8) cuenta en su mayoría con casas de adobe que datan de los años 1950, existen además algunas casas construidas de material noble que presentan serios problemas estructurales debido a que su edificación se realizó de manera artesanal. No cuenta con sistema de agua potable ni alcantarillado su fuente de agua proviene de un reservorio local que almacena agua de un puquial cercano, las aguas utilizadas para riego se distribuyen por acequias y provienen de un ramal del río Chillón.



Figura N° 8. Ubicación del Centro Poblado Huarangal



Figura N° 9. Centro Poblado "Huarangal"

La energía eléctrica fue instalada el 18 de noviembre del año 2012. El sistema de telefonía y televisión por cable con que cuentan algunas casas se debe a la instalación de una torre de transmisión instalada por una empresa operadora. Este centro poblado, conocido como Unidad Agropecuaria Huarangal, fue una hacienda privada dedicada a la agricultura tradicional hasta el año 1969, cuando se promulgó la Ley de Reforma Agraria N° 17716, cambiándose de propiedad privada a cooperativa agraria de producción.

Tabla N° 1. Número de habitantes del centro poblado Huarangal

Año	< 2 años	2 a 7 años	7 a 12 años	12 a 17 años	> 17 años	Total
1990	18	38	35	29	108	228
1991	18	39	35	30	108	230
1992	19	40	36	30	109	234
1993	19	40	36	30	109	234
1994	19	40	36	30	110	235
1995	19	40	36	30	110	236
1996	19	41	37	30	111	238
1997	19	41	37	31	111	239
1998	19	41	37	31	112	240
1999	20	41	37	31	112	241
2000	20	41	37	31	113	242
2001	20	42	37	31	113	243
2002	20	42	38	31	114	245
2003	20	42	38	32	114	246
2004	20	42	38	32	115	247
2005	20	42	38	32	116	248
2006	20	43	38	32	116	249
2007	20	43	39	32	117	250
2008	20	43	39	32	117	252
2009	21	43	39	32	118	253
2010	21	43	39	33	118	254
2011	21	44	39	33	119	255
2012	21	44	39	33	119	256
2013	21	44	40	33	120	257
2014	21	44	40	33	120	259

La tabla N° 1 muestra la evolución de la densidad poblacional de este centro poblado. En la actualidad tiene una población de 259 personas de bajos recursos económicos. Las familias están compuestas por cinco personas como promedio, en el caso de las mujeres 32% son jóvenes (18 a 29 años), 30% son adultas (29 a 60 años) y 27,5% son niñas (0 a 8 años). En el caso de los hombres, 44,0% son adultos, 29,6% son niños y

18,5% son jóvenes.

Actualmente habitan en este poblado trabajadores en su mayoría eventuales, hombres y mujeres, cuyos ingresos son menores al mínimo vital y sin beneficios sociales. Algunos habitantes han migrado temporalmente a las localidades de San Pedro de Carabayllo y Puente Piedra en donde ejercen una determinada actividad económica durante la semana, retornando a Huarangal los fines de semana.



Figura N° 10. Poblador de Huarangal

Los habitantes de este centro poblado no cuentan con una posta médica y su educación es limitada habida cuenta de que solo existe un colegio (IIEE 8189) con 24 alumnos de diferentes grados de educación en un mismo ambiente. La población escolar perteneciente a los poblados próximos al emplazamiento es relativamente baja. En la generalidad de los casos se imparte educación inicial y primaria.



Figura N° 11. Centro Educativo de Huarangal

Carecen de medios de transporte urbano, por lo que se movilizan a través de servicios de taxi, camionetas rurales o camiones.La población en general tiene secundaria completa. Los de primaria completa y secundaria incompleta optan por realizar labores agrícolas; los que tienen formación técnica o educación superior laboran en la zona urbana de Lima Metropolitana, principalmente en el Distrito de Puente Piedra. La población labora en su mayoría en agricultura, que por ser una actividad que no requiere mayor preparación académica, sus conocimientos son prácticos.

3.7.1.3. Características de salud pública.

Durante el periodo de estudio, se observó un predominio de afecciones al sistema respiratorio como faringitis, rino-faringitis, bronquitis y amigdalitis, con una mayor predominancia en los meses de invierno, principalmente en niños y adolescentes.

En los adultos y adultos mayores predominan las afecciones al aparato locomotor como dolores lumbares y tendinitis. En tercer lugar se encuentran las enfermedades infecciosas y parasitarias.

Durante las campañas de evaluación, no se identificaron casos de cáncer o displasia de tiroides, respuesta principal a la exposición con I-131, ni otro tipo de cáncer reportado.

Entre los habitantes de este centro poblado, se verificó que los 75% de hombres y mujeres, comprendidos entre los 0 y 29 años, cuentan con un seguro básico de salud, mientras que solo el 30% de los adultos mayores de 30 años cuenta con algún tipo de seguro.

Dado que no cuentan con una posta médica, los pobladores suelen atenderse en dos puestos de salud, el Puesto de Salud de Chocas y el de San Pedro de Carabayllo. En algunos años, este poblado fue beneficiado por visitas semanales de voluntarios médicos quienes ofrecían controles médicos y medicamentos básicos. En algunas ocasiones, algunos pobladores han solicitado el apoyo del servicio médico del Centro Nuclear RACSO.

3.7.2. Descargas de I-131 al medio ambiente

En un primer paso para estimar el impacto radiológico asociado al funcionamiento de las instalaciones objeto del estudio ha sido necesario considerar las actividades emitidas al exterior por los efluentes gaseosos desde el comienzo de su funcionamiento hasta el año 2014.

Para monitorear las emisiones de I-131 en aire, se instaló un equipo de muestreo ambiental con la finalidad de captar este radioisótopo en filtros de carbón activado, los cuales, luego de un periodo determinado de monitoreo, fueron evaluados en un sistema de espectrometría gamma para determinar la concentración por unidad de volumen de aire.



Figura N° 12. Estación de monitorización de aire

Tabla N° 2. Concentración de I-131 en aire (Bq/m3)

Año	Meses Calendario												Promedio
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
1990	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
1991	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
1992	1,00E-04	1,12E+00	1,00E-04	1,00E-04	3,64E-02	7,61E-02	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,03E-01
1993	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	2,25E-02	1,17E-01	2,95E-02	2,95E-02	2,49E-02	6,50E-03	6,50E-03	1,97E-02
1994	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,40E-02	6,50E-02	2,20E-01	1,10E-01	2,70E-01	1,30E-01	4,20E-01	2,30E-01	9,20E-02	1,29E-01
1995	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	8,60E-02	2,20E-01	1,90E-02	1,50E-02	6,40E-02	2,70E-01	4,40E-01	3,30E-01	1,20E-01
1996	6,40E-03	2,60E-02	3,50E+00	8,30E-03	9,00E-03	2,10E-02	1,10E-01	9,70E-02	6,10E-02	1,20E-02	1,10E-02	2,80E+00	5,55E-01
1997	4,20E-02	8,10E-01	1,00E-04	7,00E-01	2,50E-02	8,20E-02	6,20E-01	2,70E-02	4,20E-02	3,30E-02	1,00E-04	1,10E-02	1,99E-01
1998	3,18E-02	3,26E-02	1,78E-01	1,81E-01	5,30E-01	1,69E-01	8,40E-01	7,68E-02	5,40E-01	3,14E-02	2,60E-02	1,10E-01	2,29E-01
1999	5,95E-02	4,20E-02	4,25E-02	5,36E+00	1,51E+00	6,20E+00	8,77E-01	6,61E-02	1,23E+01	1,12E-01	2,14E-02	6,05E-02	2,22E+00
2000	8,00E-03	8,90E-03	3,35E-02	5,35E-01	1,43E-01	3,88E+00	2,90E+00	1,27E+00	1,23E+01	1,12E-01	1,23E+01	1,97E-02	2,79E+00
2001	3,53E-02	2,23E-01	6,35E-02	1,69E+00	5,52E-01	2,58E+00	1,31E+00	3,60E-01	6,30E+00	7,21E-02	3,09E+00	5,03E-02	1,36E+00
2002	2,58E-02	1,28E-01	3,53E-02	8,63E-01	3,65E-01	1,32E+00	6,59E-01	2,10E-01	3,17E+00	5,73E-02	1,56E+00	4,62E-02	7,03E-01
2003	2,15E-02	1,69E-01	4,78E+00	5,54E+00	6,42E-01	8,40E-01	7,68E-02	5,40E-01	3,14E-02	6,61E-02	2,14E-02	2,90E+00	1,30E+00
2004	2,75E-02	1,32E-01	1,23E+00	2,16E+00	8,90E-03	3,35E-02	7,36E-01	7,50E-01	3,20E+00	1,23E-01	1,58E+00	2,95E+00	1,08E+00
2005	8,20E-01	1,36E+00	3,39E+00	2,17E+00	4,24E-02	7,69E-01	1,49E+00	3,95E+00	3,33E+00	1,70E+00	4,53E+00	4,02E+00	2,30E+00
2006	5,76E-02	4,75E+00	5,55E+00	2,21E+00	8,12E-01	2,26E+00	5,44E+00	7,28E+00	5,03E+00	6,23E+00	8,55E+00	6,32E+00	4,54E+00
2007	1,79E-01	3,43E+00	2,59E+00	1,01E+00	1,02E+00	2,56E+00	4,24E+00	4,10E+00	3,75E+00	4,93E+00	4,96E+00	3,62E+00	3,03E+00
2008	1,62E-02	3,18E-02	7,00E-03	3,26E-02	1,78E-01	5,67E-02	9,00E-03	5,95E-02	4,20E-02	4,25E-02	2,70E-02	4,20E-02	4,53E-02
2009	1,64E-01	1,43E+00	2,51E+00	2,00E+00	4,39E-01	1,12E+00	1,81E+00	2,41E+00	2,65E+00	1,88E+00	3,03E+00	2,84E+00	1,86E+00
2010	1,84E-01	1,61E+00	2,87E+00	2,16E+00	4,49E-01	1,09E+00	1,97E+00	2,73E+00	2,58E+00	2,14E+00	3,24E+00	3,24E+00	2,02E+00
2011	2,07E-01	1,82E+00	2,59E+00	1,68E+00	4,22E-01	1,13E+00	2,24E+00	3,04E+00	2,94E+00	2,43E+00	3,70E+00	3,29E+00	2,12E+00
2012	2,32E-01	2,06E+00	2,79E+00	1,61E+00	4,81E-01	1,28E+00	2,46E+00	3,37E+00	2,90E+00	2,76E+00	4,00E+00	3,34E+00	2,27E+00
2013	1,48E-01	2,16E+00	2,70E+00	1,53E+00	5,43E-01	1,36E+00	2,59E+00	3,28E+00	2,84E+00	2,92E+00	3,93E+00	3,24E+00	2,27E+00
2014	1,61E-01	1,79E+00	2,29E+00	1,43E+00	5,05E-01	1,23E+00	2,19E+00	2,71E+00	2,53E+00	2,44E+00	3,27E+00	2,80E+00	1,95E+00

La Tabla N° 2 muestra la concentración promedio de I-131 en aire expresada en becquereles por metro cúbico, dentro del período 1990 – 2014, se puede observar el incremento de los niveles de radiactividad con el transcurso del tiempo.

Tabla N° 3. Descargas de I-131 en la chimenea de la Planta de Producción de Radioisótopos (becquereles/segundo)

Año	Meses Calendario												Promedio
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
1990	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00
1991	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00
1992	1,57E+00	1,76E+04	1,57E+00	1,57E+00	5,72E+02	1,20E+03	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,62E+03
1993	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	3,54E+02	1,84E+03	4,64E+02	4,64E+02	3,92E+02	1,02E+02	1,02E+02	3,10E+02
1994	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	2,20E+02	1,02E+03	3,46E+03	1,73E+03	4,25E+03	2,04E+03	6,60E+03	3,62E+03	1,45E+03	2,03E+03
1995	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,57E+00	1,35E+03	3,46E+03	2,99E+02	2,36E+02	1,01E+03	4,25E+03	6,92E+03	5,19E+03	1,89E+03
1996	1,01E+02	4,09E+02	5,50E+04	1,31E+02	1,42E+02	3,30E+02	1,73E+03	1,53E+03	9,59E+02	1,89E+02	1,73E+02	4,40E+04	8,73E+03
1997	6,60E+02	1,27E+04	1,57E+00	1,10E+04	3,93E+02	1,29E+03	9,75E+03	4,25E+02	6,60E+02	5,19E+02	1,57E+00	1,73E+02	3,13E+03
1998	5,00E+02	5,13E+02	2,80E+03	2,85E+03	8,33E+03	2,66E+03	1,32E+04	1,21E+03	8,49E+03	4,94E+02	4,09E+02	1,73E+03	3,60E+03
1999	9,36E+02	6,60E+02	6,68E+02	8,43E+04	2,37E+04	9,75E+04	1,38E+04	1,04E+03	1,94E+05	1,76E+03	3,36E+02	9,51E+02	3,49E+04
2000	1,26E+02	1,40E+02	5,27E+02	8,41E+03	2,25E+03	6,10E+04	4,56E+04	2,00E+04	1,94E+05	1,76E+03	1,94E+05	3,10E+02	4,39E+04
2001	5,55E+02	3,51E+03	9,99E+02	2,66E+04	8,68E+03	4,06E+04	2,06E+04	5,66E+03	9,91E+04	1,13E+03	4,86E+04	7,91E+02	2,14E+04
2002	4,05E+02	2,01E+03	5,54E+02	1,36E+04	5,74E+03	2,08E+04	1,04E+04	3,30E+03	4,99E+04	9,01E+02	2,45E+04	7,26E+02	1,11E+04
2003	3,38E+02	2,65E+03	7,52E+04	8,71E+04	1,01E+04	1,32E+04	1,21E+03	8,49E+03	4,94E+02	1,04E+03	3,36E+02	4,56E+04	2,05E+04
2004	4,33E+02	2,08E+03	1,93E+04	3,39E+04	1,40E+02	5,27E+02	1,16E+04	1,18E+04	5,04E+04	1,94E+03	2,48E+04	4,63E+04	1,69E+04
2005	1,29E+04	2,14E+04	5,33E+04	3,41E+04	6,67E+02	1,21E+04	2,34E+04	6,21E+04	5,23E+04	2,68E+04	7,12E+04	6,33E+04	3,61E+04
2006	9,06E+02	7,47E+04	8,73E+04	3,47E+04	1,28E+04	3,55E+04	8,55E+04	1,14E+05	7,91E+04	9,79E+04	1,34E+05	9,94E+04	7,14E+04
2007	2,81E+03	5,40E+04	4,07E+04	1,58E+04	1,61E+04	4,03E+04	6,67E+04	6,45E+04	5,90E+04	7,75E+04	7,79E+04	5,69E+04	4,77E+04
2008	2,55E+02	5,00E+02	1,10E+02	5,13E+02	2,80E+03	8,92E+02	1,42E+02	9,36E+02	6,60E+02	6,68E+02	4,25E+02	6,60E+02	7,13E+02
2009	2,58E+03	2,25E+04	3,95E+04	3,14E+04	6,90E+03	1,76E+04	2,84E+04	3,79E+04	4,17E+04	2,95E+04	4,77E+04	4,47E+04	2,92E+04
2010	2,89E+03	2,54E+04	4,51E+04	3,39E+04	7,06E+03	1,72E+04	3,10E+04	4,29E+04	4,05E+04	3,36E+04	5,10E+04	5,10E+04	3,18E+04
2011	3,25E+03	2,86E+04	4,08E+04	2,63E+04	6,63E+03	1,77E+04	3,52E+04	4,78E+04	4,62E+04	3,83E+04	5,82E+04	5,17E+04	3,34E+04
2012	3,65E+03	3,24E+04	4,38E+04	2,53E+04	7,56E+03	2,02E+04	3,86E+04	5,30E+04	4,56E+04	4,35E+04	6,30E+04	5,25E+04	3,58E+04
2013	2,33E+03	3,40E+04	4,25E+04	2,40E+04	8,54E+03	2,13E+04	4,08E+04	5,16E+04	4,47E+04	4,59E+04	6,18E+04	5,10E+04	3,57E+04
2014	2,54E+03	2,82E+04	3,61E+04	2,25E+04	7,94E+03	1,93E+04	3,44E+04	4,27E+04	3,98E+04	3,84E+04	5,14E+04	4,41E+04	3,06E+04

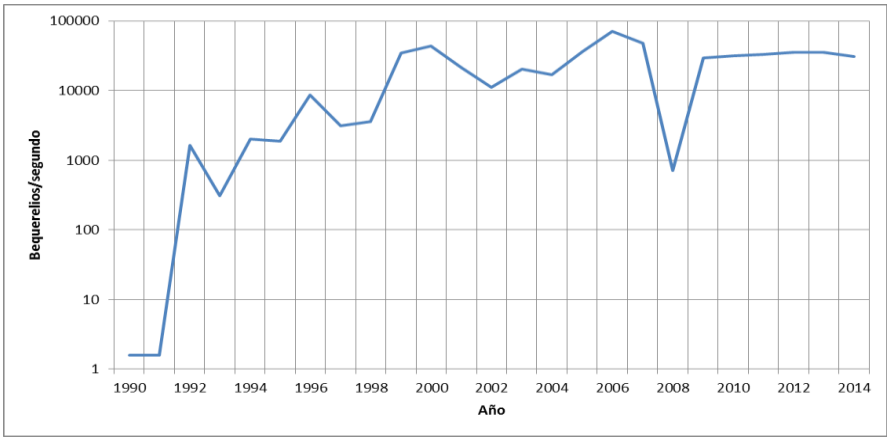

Figura N° 13. Evolución de las descargas de I-131 al ambiente

La Tabla N° 3 y Figura N° 13 muestran la evolución de las descargas de I-131 desde el año 1990 al 2014, tomando como referencia un factor de dilución de 6,36 x 10-5.

3.7.3. Estimación de la dosis por efluentes gaseosos

Una vez que el material radiactivo se libera a la atmósfera, la difusión y el transporte atmosférico actúan dispersando los contaminantes en el medio ambiente a un ritmo que depende de la velocidad del viento, de la estabilidad térmica, de la precipitación y de las características del terreno.

Para tener en cuenta la especificidad de cada uno de los emplazamientos, en el estudio se han utilizado las condiciones meteorológicas registradas por la estación meteorológica de la instalación. A partir de la actividad liberada y teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas propias del emplazamiento se han determinado, las concentraciones de material radiactivo presentes en el aire en el Centro Poblado Huarangal.

Para ello se ha considerado la ubicación de este centro poblado respecto al centro nuclear, su distancia, sector de la rosa de vientos y evolución de la densidad poblacional desde el año 1990 al 2014.

Conocidas las concentraciones del radioisótopo en el aire se han simulado los mecanismos de llegada hasta los individuos de la población mediante su impacto directo. La vía de exposición considerada en este estudio se debe al proceso de inhalación del I-131 contenido en la nube radiactiva.

Tabla N° 4. Concentración de I-131 en el Centro Poblado Huarangal (Bq/m3)

Año	Meses Calendario												Promedio
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
1990	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05
1991	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05
1992	2,42E-05	2,71E-01	2,42E-05	2,42E-05	8,81E-03	1,84E-02	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,49E-02
1993	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	5,45E-03	2,83E-02	7,14E-03	7,14E-03	6,03E-03	1,57E-03	1,57E-03	4,78E-03
1994	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	3,39E-03	1,57E-02	5,33E-02	2,66E-02	6,54E-02	3,15E-02	1,02E-01	5,57E-02	2,23E-02	3,13E-02
1995	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,08E-02	5,33E-02	4,60E-03	3,63E-03	1,55E-02	6,54E-02	1,07E-01	7,99E-02	2,91E-02
1996	1,55E-03	6,30E-03	8,47E-01	2,01E-03	2,18E-03	5,08E-03	2,66E-02	2,35E-02	1,48E-02	2,91E-03	2,66E-03	6,78E-01	1,34E-01
1997	1,02E-02	1,96E-01	2,42E-05	1,69E-01	6,05E-03	1,99E-02	1,50E-01	6,54E-03	1,02E-02	7,99E-03	2,42E-05	2,66E-03	4,83E-02
1998	7,70E-03	7,89E-03	4,31E-02	4,38E-02	1,28E-01	4,09E-02	2,03E-01	1,86E-02	1,31E-01	7,60E-03	6,30E-03	2,66E-02	5,54E-02
1999	1,44E-02	1,02E-02	1,03E-02	1,30E+00	3,66E-01	1,50E+00	2,12E-01	1,60E-02	2,98E+00	2,71E-02	5,18E-03	1,46E-02	5,38E-01
2000	1,94E-03	2,16E-03	8,11E-03	1,30E-01	3,46E-02	9,39E-01	7,02E-01	3,08E-01	2,98E+00	2,71E-02	2,98E+00	4,77E-03	6,77E-01
2001	8,55E-03	5,41E-02	1,54E-02	4,10E-01	1,34E-01	6,25E-01	3,17E-01	8,72E-02	1,53E+00	1,75E-02	7,48E-01	1,22E-02	3,30E-01
2002	6,24E-03	3,09E-02	8,54E-03	2,09E-01	8,84E-02	3,20E-01	1,60E-01	5,08E-02	7,68E-01	1,39E-02	3,77E-01	1,12E-02	1,70E-01
2003	5,21E-03	4,08E-02	1,16E+00	1,34E+00	1,56E-01	2,03E-01	1,86E-02	1,31E-01	7,60E-03	1,60E-02	5,18E-03	7,02E-01	3,15E-01
2004	6,67E-03	3,20E-02	2,98E-01	5,23E-01	2,16E-03	8,11E-03	1,78E-01	1,82E-01	7,76E-01	2,99E-02	3,83E-01	7,13E-01	2,61E-01
2005	1,99E-01	3,30E-01	8,20E-01	5,25E-01	1,03E-02	1,86E-01	3,60E-01	9,57E-01	8,05E-01	4,12E-01	1,10E+00	9,74E-01	5,56E-01
2006	1,39E-02	1,15E+00	1,34E+00	5,35E-01	1,97E-01	5,46E-01	1,32E+00	1,76E+00	1,22E+00	1,51E+00	2,07E+00	1,53E+00	1,10E+00
2007	4,32E-02	8,32E-01	6,27E-01	2,44E-01	2,48E-01	6,21E-01	1,03E+00	9,93E-01	9,09E-01	1,19E+00	1,20E+00	8,77E-01	7,34E-01
2008	3,92E-03	7,70E-03	1,69E-03	7,89E-03	4,31E-02	1,37E-02	2,18E-03	1,44E-02	1,02E-02	1,03E-02	6,54E-03	1,02E-02	1,10E-02
2009	3,97E-02	3,46E-01	6,08E-01	4,84E-01	1,06E-01	2,71E-01	4,37E-01	5,84E-01	6,42E-01	4,55E-01	7,34E-01	6,88E-01	4,50E-01
2010	4,45E-02	3,91E-01	6,94E-01	5,23E-01	1,09E-01	2,64E-01	4,77E-01	6,61E-01	6,24E-01	5,18E-01	7,85E-01	7,85E-01	4,90E-01
2011	5,01E-02	4,41E-01	6,28E-01	4,06E-01	1,02E-01	2,73E-01	5,43E-01	7,36E-01	7,12E-01	5,89E-01	8,96E-01	7,97E-01	5,14E-01
2012	5,63E-02	5,00E-01	6,75E-01	3,89E-01	1,16E-01	3,11E-01	5,95E-01	8,16E-01	7,03E-01	6,69E-01	9,70E-01	8,09E-01	5,51E-01
2013	3,59E-02	5,24E-01	6,54E-01	3,70E-01	1,32E-01	3,29E-01	6,28E-01	7,95E-01	6,88E-01	7,06E-01	9,52E-01	7,85E-01	5,50E-01
2014	3,91E-02	4,34E-01	5,55E-01	3,46E-01	1,22E-01	2,97E-01	5,30E-01	6,57E-01	6,13E-01	5,92E-01	7,92E-01	6,79E-01	4,71E-01

La tabla N° 4 presenta la concentración estimada de I-131 en el aire del centro poblado Huarangal ubicado a un kilómetro de distancia en dirección Nor-Este de la chimenea de la PPR.Para el desarrollo de las estimaciones dosimétricas por inhalación del I-131 se ha utilizado como referencia la información proporcionada por el OIEA.

Mediante el uso de estas herramientas en el presente estudio se ha determinado la dosis equivalente efectiva por categorías de edad, con hábitos de consumo medios, residente en el centro poblado. Se han considerado las emisiones anuales de material radiactivo desde el comienzo de funcionamiento hasta el año 2014 y las condiciones meteorológicas.

Otros parámetros necesarios para los cálculos y las referencias de donde se han extraído son: constantes de desintegración radiactiva, factores de conversión a dosis efectiva por inhalación e ingestión y tasa de respiración pulmonar.

Tabla N° 5. Tasa de respiración pulmonar por grupos de edad

Grupos de edad (años)	Tasa de respiración (metros cúbicos/minuto)
Menores de 2	**0,0020**
2 a 7	**0,0030**
7 a 12	**0,0045**
12 a 17	**0,0060**
Mayores de 17	**0,0060**

La Tabla N° 5 muestra la tasa de respiración pulmonar, en metros cúbicos por minuto, para los diferentes grupos de edad.

Tabla N° 6. Incorporación anual de I-131 por miembros del centro poblado Huarangal según grupos de edad (becquereles).

Año	< 2 años	2 a 7 años	7 a 12 años	12 a 17 años	> 17 años
1990	0,0042	0,0127	0,0191	0,0255	**0,0255**
1991	0,0042	0,0127	0,0191	0,0255	**0,0255**
1992	4,3603	13,0810	19,6215	26,1620	**26,1620**
1993	0,8375	2,5125	3,7687	5,0250	**5,0250**
1994	5,4842	16,4526	24,6788	32,9051	**32,9051**
1995	5,1063	15,3188	22,9782	30,6376	**30,6376**
1996	23,5506	70,6517	105,9776	141,3035	**141,3035**
1997	8,4570	25,3709	38,0563	50,7417	**50,7417**
1998	9,7098	29,1295	43,6943	58,2590	**58,2590**
1999	94,2560	282,7681	424,1522	565,5362	**565,5362**
2000	118,5434	355,6301	533,4451	711,2601	**711,2601**
2001	57,7415	173,2246	259,8370	346,4493	**346,4493**
2002	29,8325	89,4976	134,2464	178,9952	**178,9952**
2003	55,2633	165,7900	248,6851	331,5801	**331,5801**
2004	45,6998	137,0994	205,6491	274,1989	**274,1989**

2005	97,4450	292,3350	438,5025	584,6700	**584,6700**
2006	192,6048	577,8145	866,7217	1155,6290	**1155,6290**
2007	128,6534	385,9602	578,9404	771,9205	**771,9205**
2008	1,9235	5,7705	8,6558	11,5411	**11,5411**
2009	78,7746	236,3239	354,4859	472,6478	**472,6478**
2010	85,7664	257,2991	385,9486	514,5982	**514,5982**
2011	90,1239	270,3718	405,5577	540,7436	**540,7436**
2012	96,4702	289,4107	434,1161	578,8215	**578,8215**
2013	96,3310	288,9930	433,4895	577,9859	**577,9859**
2014	**82,5776**	**247,7328**	**371,5991**	**495,4655**	**495,4655**

La tabla N° 6 se presenta la cantidad total anual de I-131 incorporado por miembros del centro poblado Huarangal, para ello se ha considerado que los niños menores de 2 años permanecen solo 4 horas expuestos a la nube radiactiva fuera de sus hogares, mientras que para el resto de la población se ha considerado un tiempo de permanencia de 8 horas diarias.

Tabla N° 7. Factores dosimétricos debido a la incorporación de I-131 por inhalación (mSv/Bq)

Grupos de edad (años)	Factor dosimétrico (miliSievert/becquerel)
Menores de 2	**$7{,}20 \times 10^{-5}$**
2 a 7	**$3{,}70 \times 10^{-5}$**
7 a 12	**$1{,}90 \times 10^{-5}$**
12 a 17	**$1{,}10 \times 10^{-5}$**
Mayores de 17	**$7{,}40 \times 10^{-6}$**

La tabla N° 7 muestra los factores dosimétricos expresados en miliSievert por Becquerel los cuales fueron empleados para la estimación de las dosis en los habitantes de Huarangal.

Tabla N° 8. Dosis efectiva comprometida anual (mSv).

Año	< 2 años	2 a 7 años	7 a 12 años	12 a 17 años	> 17 años
1990	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0000**
1991	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	**0,0000**
1992	0,0003	0,0005	0,0004	0,0003	**0,0002**
1993	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	**0,0000**
1994	0,0004	0,0006	0,0005	0,0004	**0,0002**
1995	0,0004	0,0006	0,0004	0,0003	**0,0002**
1996	0,0017	0,0026	0,0020	0,0016	**0,0010**
1997	0,0006	0,0009	0,0007	0,0006	**0,0004**
1998	0,0007	0,0011	0,0008	0,0006	**0,0004**
1999	0,0068	0,0105	0,0081	0,0062	**0,0042**
2000	0,0085	0,0132	0,0101	0,0078	**0,0053**
2001	0,0042	0,0064	0,0049	0,0038	**0,0026**

2002	0,0021	0,0033	0,0026	0,0020	**0,0013**
2003	0,0040	0,0061	0,0047	0,0036	**0,0025**
2004	0,0033	0,0051	0,0039	0,0030	**0,0020**
2005	0,0070	0,0108	0,0083	0,0064	**0,0043**
2006	0,0139	0,0214	0,0165	0,0127	**0,0086**
2007	0,0093	0,0143	0,0110	0,0085	**0,0057**
2008	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	**0,0001**
2009	0,0057	0,0087	0,0067	0,0052	**0,0035**
2010	0,0062	0,0095	0,0073	0,0057	**0,0038**
2011	0,0065	0,0100	0,0077	0,0059	**0,0040**
2012	0,0069	0,0107	0,0082	0,0064	**0,0043**
2013	0,0069	0,0107	0,0082	0,0064	**0,0043**
2014	0,0059	0,0092	0,0071	0,0055	**0,0037**
Acumulado	**0,1015**	**0,1565**	**0,1205**	**0,0930**	**0,0626**

La tabla N° 8 muestra la dosis comprometida efectiva individual debido a la inhalación de I- 131, para cada año, expresada en miliSievert (mSv). La dosis integrada individual acumulada para los diferentes grupos poblacionales evaluados durante el periodo del estudio (1990 a 2014) se presenta en la Figura N° 14.

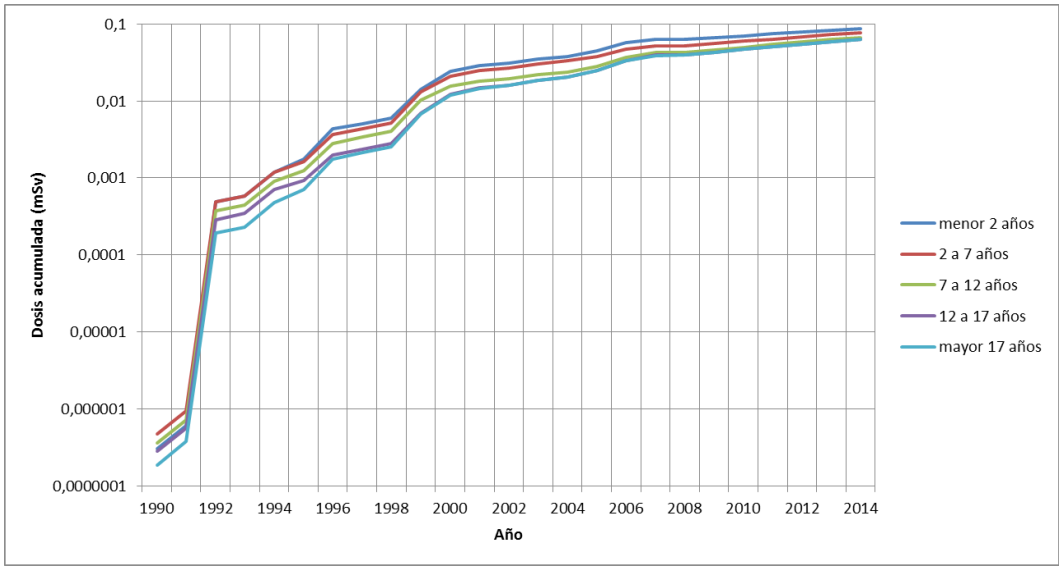

Figura N° 14. Dosis individual acumulada en habitantes del Centro Poblado Huarangal

La dosis colectiva para el centro poblado Huarangal se calculó en base al número de habitantes por grupos de edad y la dosis anual para cada año del periodo de estudio. Se puede observar que el mayor valor se obtuvo en el año 2006 (Tabla N° 9).

En base a estos resultados, se puede interpretar que las liberaciones de I-131 han contribuido a incrementar la dosis en la población de Huarangal en un orden de magnitud muy pequeño como para generar riesgo de aparición de efectos deterministas, por otro

lado, las dosis poblacionales debido a fuentes artificiales no llegan a superar el 10% del límite anual por lo que el riesgo de efectos estocásticos es muy bajo.

Tabla N° 9. Dosis colectiva en el centro poblado Huarangal (mSv-hombre)

Año	1 a 2 años	2 a 7 años	7 a 12 años	12 a 17 años	+ 17 años	Total	Acumulada
1990	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	**0,0001**
1991	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	**0,0001**
1992	0,0060	0,0194	0,0134	0,0086	0,0211	0,0685	**0,0686**
1993	0,0011	0,0037	0,0026	0,0017	0,0041	0,0132	**0,0818**
1994	0,0075	0,0245	0,0170	0,0109	0,0267	0,0866	**0,1683**
1995	0,0071	0,0229	0,0159	0,0102	0,0250	0,0810	**0,2493**
1996	0,0327	0,1061	0,0736	0,0473	0,1157	0,3754	**0,6248**
1997	0,0118	0,0383	0,0266	0,0171	0,0417	0,1355	**0,7602**
1998	0,0136	0,0442	0,0306	0,0197	0,0482	0,1563	**0,9165**
1999	0,1328	0,4311	0,2988	0,1922	0,4698	1,5248	**2,4413**
2000	0,1678	0,5448	0,3776	0,2429	0,5938	1,9270	**4,3683**
2001	0,0822	0,2666	0,1848	0,1189	0,2906	0,9431	**5,3114**
2002	0,0426	0,1384	0,0960	0,0617	0,1509	0,4896	**5,8010**
2003	0,0794	0,2576	0,1786	0,1149	0,2808	0,9113	**6,7124**
2004	0,0660	0,2141	0,1484	0,0955	0,2333	0,7572	**7,4696**
2005	0,1413	0,4586	0,3179	0,2045	0,4999	1,6223	**9,0918**
2006	0,2806	0,9108	0,6314	0,4061	0,9927	3,2216	**12,3134**
2007	0,1883	0,6112	0,4237	0,2726	0,6662	2,1620	**14,4755**
2008	0,0028	0,0092	0,0064	0,0041	0,0100	0,0325	**14,5079**
2009	0,1164	0,3777	0,2619	0,1685	0,4117	1,3362	**15,8441**
2010	0,1273	0,4132	0,2864	0,1843	0,4504	1,4615	**17,3056**
2011	0,1344	0,4362	0,3024	0,1945	0,4754	1,5428	**18,8485**
2012	0,1445	0,4690	0,3251	0,2092	0,5112	1,6591	**20,5075**
2013	0,1450	0,4705	0,3262	0,2098	0,5128	1,6642	**22,1717**
2014	**0,1248**	**0,4051**	**0,2809**	**0,1807**	**0,4416**	**1,4331**	**23,6049**

La tabla N° 9 muestra la dosis colectiva generada en los diferentes grupos de edad en donde se aprecia que el impacto radiodosimétrico es bajo para el periodo de estudio realizado.

Para estimar el riesgo de cáncer por exceso, se tomó como referencia un valor de 0,97 x Sv-1 para las diferentes causas de cáncer de 1,931 x Sv-1 para casos de leucemia (Cardiset al, 2005). Los excesos de riesgo para cada uno de los grupos estudiados desde 1990 a 2014 se presentan en la Figura N° 15.

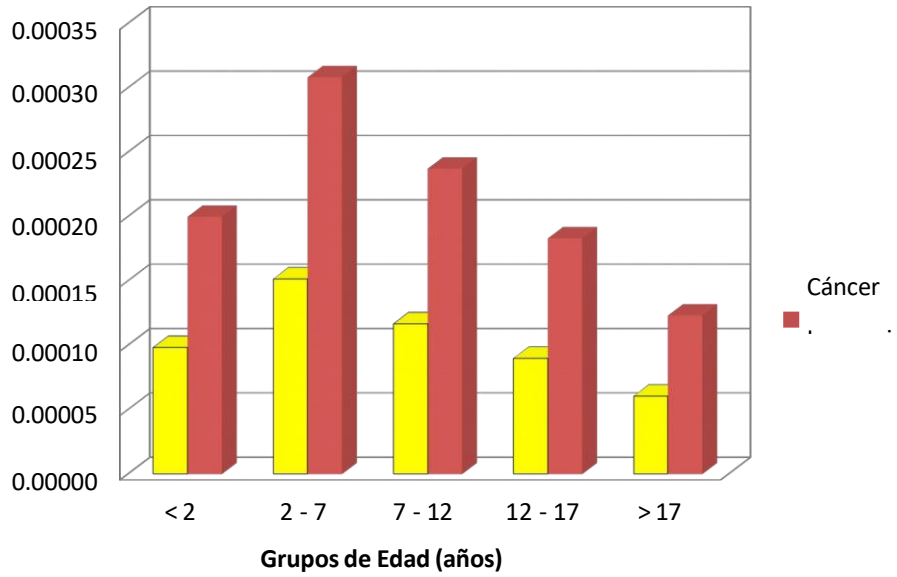

Figura N° 15. Exceso de Riesgode cáncer en la población de Huarangal

3.8. Discusión

La red de sucesos se inicia con la fuente de exposición la cual está constituida por la PPR del Centro Nuclear Oscar Miró Quesada de la Guerra "RACSO", el radioyodo se transfiere por diferentes vías, especialmente por la atmósfera, y produce un impacto radiosanitario en los individuos de Huarangal con la consecuente incorporación en la población.

Como resultado de este estudio, se ha comprobado que los pobladores están expuestos en muy pequeña proporción a esta fuente radiactiva pero sin embargo, también se encuentran expuestos a fuentes ambientales y médicas.

Si tomamos como referencia la exposición anual promedio del público que es de 2,4 mSv debido a fuentes naturales y el límite de dosis de 1,0 mSv debido a fuentes artificiales, se observa que la máxima exposición recibida por los habitantes de Huarangal, debido a la incorporación de I-131 por inhalación, fue de 0,0214 mSv en niños de 2 a 7 años durante el año 2006, esta dosis solo representa el 0,89% de la dosis debida a fuentes naturales y el 2,14% de la dosis límite debido a fuentes artificiales, estos valores son inferiores si se comparan con los de Hall et al (1992) quienes encontraron que un riesgo de leucemia a los 2 años después de la exposición es significativo cuando alcanza

los 14 mSv.

La introducción de una nueva actividad en la zona, como es la producción de radioisótopos, principalmente I-131 utilizado para fines médicos, ha generado una nueva fuente de exposición a los pobladores de Huarangal, quienes al encontrarse en dirección Nor-Este del Centro Nuclear, constituyen el grupo crítico de estas actividades, sin embargo, a nivel poblacional, no se ha dado un incremento en el número de individuos expuestos pues, como se puede observar en la Tabla N°1, el índice de crecimiento poblacional se encuentra muy por debajo de la media nacional, alcanzando solo el 0,5% anual, a diferencia del 1,7% anual (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 1996).

Esta tasa de crecimiento poblacional no se debe a la disminución en la fertilidad de las mujeres de la zona, sino a la migración de sus habitantes a localidades como Puente Piedra o Carabayllo con la finalidad de buscar una mejora en su calidad de vida.

Las acciones destinadas a disminuir la exposición son de exclusiva responsabilidad del Centro Nuclear “RACSO”, para ello, sus instalaciones cuentan con un sistema de filtros que retienen hasta en un 99% las emisiones de radioyodos a la atmósfera, evitando así un compromiso de dosis en la población y el medio ambiente comprendidos dentro del área de influencia de este emplazamiento, sin embargo, no existe forma de reducir aún más estas descargas sobre Huarangal pues la vía de transferencia representativa está dada por la dirección y velocidad del viento, que es una variable constante en esta región

En situaciones de exposiciones planificadas, se considera como la deliberada introducción de material radiactivo debido a una instalación; esta situación planificada, que es la que actualmente se viene dando en Huarangal, esto incluye exposiciones que se estima ocurran por efecto de las actividades rutinarias y las exposiciones que no pueden predecirse, las cuales son llamadas exposiciones potenciales como por ejemplo las provenientes de los recursos hídricos y de alimentos contaminados con I-131, estas exposiciones no se tomaron en cuenta debido a que la fuente más importante de exposición proveniente de la fuente es el aire y pueden constituir materia de una nueva investigación.

En situaciones de emergencia, se van a requerir adoptar medidas que permitan

evitar o reducir consecuencias indeseables (OIEA, 2000).De acuerdo a los resultados del estudio, es muy baja la probabilidad de una situación de este tipo debido al sistema de contención de las instalaciones.

Los estudios pre-operacionales demuestran que la exposición de los pobladores a radiactividad artificial ocurre desde 1990, con el inicio de las operaciones del Centro Nuclear "RACSO", por lo tanto, este estudio no contempla este tipo de exposición habida cuenta de que antes de 1990 no existía ninguna fuente de emisión radiactiva.

Considerando los resultados obtenidos, se puede verificar que la dosis recibida por los pobladores de Huarangal se ha incrementado en función del tiempo, sin embargo, el exceso de riesgo es extremadamente bajo, así, se puede estimar que para que se presente un caso de leucemia por exceso en niños con edades entre 7 y 12 años, se requiere una población de 3500 niños con estos rangos de edad, es decir 87,5 veces más niños con respecto a la población actual que es de 40 niños en promedio.

Los estilos de vida de la población de Huarangal los expone a otros factores de riesgo carcinogénicos convencionales (exposición prolongada a la luz solar, uso ineficiente de sustancias empleadas en actividades agrícolas, dieta, etc.).

Por lo tanto, los principales factores de morbilidad y mortalidad en esta población lo siguen constituyendo la extrema pobreza, la desnutrición, la ineficiente educación y las enfermedades respiratorias y transmisibles.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La presente investigación permitió establecer, con base en mediciones sistemáticas y análisis epidemiológicos, una evaluación del impacto radiológico generado por las descargas atmosféricas de yodo-131 (I-131) provenientes del Centro Nuclear Oscar Miró Quesada de la Guerra (RACSO), sobre la comunidad de Huarangal entre los años 1990 y 2014. A continuación, se exponen las principales conclusiones:

1. **Presencia sostenida de I-131 en el aire**: Las mediciones realizadas mediante espectrometría gamma confirmaron la presencia continua de I-131 en el entorno aéreo del centro poblado de Huarangal. Las concentraciones, aunque en niveles bajos, mostraron incrementos significativos en algunos años, especialmente a partir de 1999, coincidiendo con el aumento de las actividades de la Planta de Producción de Radioisótopos.

2. **Dosis individuales y colectivas acumuladas**: La estimación dosimétrica por inhalación reveló que la población ha recibido dosis acumuladas que, aunque están por debajo del umbral de efectos deterministas, podrían representar un riesgo marginal de efectos estocásticos (como cánceres inducidos) a largo plazo. La dosis colectiva acumulada durante el periodo de estudio fue de **23,60 mSv-hombre**, siendo los años 2000 y 2006 los de mayor contribución.

3. **Mayor vulnerabilidad de los menores de edad**: El análisis por grupos etarios evidenció que los menores de dos años presentan la mayor tasa de dosis comprometida por unidad de becquerel incorporado, debido a su mayor radiosensibilidad y a tasas de respiración más altas en relación a su masa corporal. Este grupo, por tanto, debe considerarse prioritario en futuros planes de protección radiológica.

4. **Riesgo bajo pero no despreciable**: Si bien los valores de dosis anual estuvieron dentro de los límites internacionales recomendados, el análisis del exceso de riesgo relativo mostró que el riesgo de aparición de cáncer de tiroides, aunque bajo, no puede ser descartado, especialmente en individuos con exposición acumulativa o predisposición genética.

5. **Condiciones socioeconómicas agravantes**: La limitada infraestructura sanitaria, la deficiente cobertura médica y la escasa educación en salud ambiental en Huarangal incrementan la vulnerabilidad social frente a un evento radiológico. La ausencia de mecanismos sistemáticos de vigilancia ambiental y epidemiológica constituye un vacío crítico.

6. **Necesidad de vigilancia permanente**: El estudio evidenció que, aunque las emisiones se encuentran reguladas, el monitoreo de su impacto sobre poblaciones vulnerables requiere mayor frecuencia, cobertura y acceso a la información por parte de la comunidad.

Recomendaciones

Con base en las conclusiones alcanzadas, se proponen las siguientes recomendaciones, dirigidas a fortalecer la gestión del riesgo radiológico, mejorar la calidad de vida de la población expuesta y prevenir posibles impactos futuros:

1. **Implementar un sistema de vigilancia ambiental continuo y descentralizado**, que permita el monitoreo rutinario de radionucleídos en aire, suelos, cultivos y productos lácteos en zonas aledañas a RACSO, utilizando técnicas validadas y filtros multiespecie como los propuestos por Budyka y Ogorodnikov (1993).

2. **Desarrollar un programa de vigilancia epidemiológica longitudinal** para evaluar indicadores de salud relacionados con la exposición crónica a bajas dosis de radiación, en especial enfermedades tiroideas y patologías oncológicas en poblaciones sensibles.

3. **Fortalecer la educación sanitaria y la comunicación de riesgos**, promoviendo talleres comunitarios en Huarangal sobre los efectos de las radiaciones ionizantes,

vías de exposición y medidas de autoprotección, con énfasis en mujeres gestantes, niños y adultos mayores.

4. **Revisar y actualizar los límites de emisión autorizados** para radionucleídos en función de escenarios locales de exposición, considerando factores geográficos, meteorológicos y sociales específicos de la zona de influencia.

5. **Fomentar estudios complementarios sobre bioacumulación y transferencia ambiental** de radionucleídos en el valle del río Chillón, incluyendo análisis en agua, cultivos hortícolas y ganado, con el fin de comprender rutas indirectas de exposición y diseñar medidas de mitigación agrícola.

6. **Incorporar sensores meteorológicos avanzados y sistemas de modelado de dispersión en tiempo real**, que permitan anticipar situaciones de riesgo en función del régimen de vientos y condiciones atmosféricas locales, especialmente en temporadas de inversión térmica intensa.

7. **Establecer protocolos de emergencia y planes de contingencia adaptados al contexto rural**, con participación activa de la comunidad, para responder de manera eficaz ante eventos accidentales que involucren liberación de material radiactivo.

8. **Promover la inclusión del estudio del caso de Huarangal en las políticas públicas de salud ambiental y nuclear**, a fin de convertirlo en un referente técnico-científico sobre gestión de riesgo radiológico en comunidades vulnerables.

REFERENCIAS

Akahane, K., Yonai, S., Fukuda, S., Miyahara, N., Yasuda, H., Iwaoka, K., Matsumoto, M., FukumuraA. and Akashi, M. (2012).The Fukushima Nuclear Power Plant accident and exposures in the environment.Environmentalist(32). 136-143.

Alfaro, M. y Vargas, C. (2005).Energía y Tecnología Nuclear. (pp. 319). Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Alonso, JM., Jiménez, D., Palacios, JJ., Royo, C., Urbina, JR., Santiago, C. y Bárcena, A. (2004) Prevalencia y distribución geográfica del cáncer en el área de salud de Guadalajara. Revista Española de Salud Pública (78). 83-94.

Alonso, C., Guillen, A., Cartas, H., Morera, Y. andDíaz, M. (2012).Observations of Fallout from the Fukushima Reactor Accident in Cienfuegos, Cuba.Bull EnvironContamToxicology(88). 752-754.

Azuela, LF. y Talancón L. (1999).Contracorriente: Historia de la Energía Nuclear en México 1945-1995. (pp. 371). México, Ed. Plaza y Valdez S.A.

Boticario, C. y Cascales, M. (2008).Innovaciones en cáncer. (pp. 113). Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED

Brenner, AV., Tronko, MD., Hatch, M., Bogdanova, TI., Oliynik, VA., Lubin, JH., Zablotska, LB., Tereschenko, VP., McConnell, RJ., Zamotaeva, GA., O´Kane, P., Bouville, AC., Chaykovskaya, LV., Greennaum, E., Paster, IP., Shpak, VM. and Ron,

E. (July2011).I-131 Dose Response for Incident Thyroid Cancers in Ukraine Related to the Chernobyl Accident. Environmental Health Perspectives.Vol. 117 (7).933-939.

Budyka, AK. and Ogorodnikov, BL. (1993).Calculation of gaseous forms and sizes of aerosol particles 131-Iodine: the radioactive fallout of Chernobyl accident by calculation of inhaled radiation dose. Radiats. Biol. Radioecol. Vol.33(5). 611-

619.

Caicedo, R., Arguelles, G. y Alzate, A. (1996) Exposición a dosis bajas de radiación ionizante en el Hospital Universitario del Valle, Cali, 1980-1992. Colombia Médica. Vol.27 (3-4).134-37.

Cardis, E.,Vrijheid, M., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., Howe, G., Kaldor, J., Muirhead, CR., Schubauer-Berigan, M., Yoshimura, T., Bermann, F., Cowper, G., Fix, J., Hacker, C., Heinmiller, B., Marshall, M., Utterback, D., Ahn, Y-O., Amoros, E., Ashmore, P., Auvinen, A., Bae, JM., Bernar, J., Biau, A., Combalot, E., Deboodt, P., Diez, A., Eklof, M., Engels, H., Engholm, G., Gulis, G., Habib, R., Holan, K., Hyvonen, H., Kerekes, A., Kurtinaitis, J., Malker, H., Martuzzi, M., Mastauskas, A., Monnet, A., Moser, M., Pearce, MS., Richardson, DB., Rodriguez-Artalejo, F., Rogel, A., Tardy, H., Telle-Lamberton, M., Turai, I., Usel, M. andVeress, K. (2005) Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries.BMJ, doi:10.1136/bmj.38499.599861.E0 (published 29 June 2005).

Córdoba, G. (2004) La Tesis y el Trabajo de Tesis. (pp. 35). México.Editorial Limusa.

CSN (2009) Estudio epidemiológico del posible efecto de las radiaciones ionizantes derivadas del funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear españolas sobre la salud de la población que reside en su proximidad. Informe Final. (218 páginas). Madrid, España. Consejo de Seguridad Nuclear.

Frisancho, I., Pardo, G., Pizarro, M. y Jibaja, E. (1962).Estudio preliminar de la radiactividad ambiental.Bol. JCEA, 7(40). 18-22.

Gonzáles, S., Osores, J., López, E., Martínez, J., Jara, R. yAnaya, A. (2001). Informe de Radiactividad Ambiental 1999-2000. Lima, Perú. Instituto Peruano de Energía Nuclear.

Gonzáles, S., Osores, J., López, E., Martínez, J., Jara, R. yAnaya, A. (2002). Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental enel Centro Nuclear RACSO 1998-2001. Informe Científico-Tecnológico 1998-2001. (pp. 346-347).Lima, Perú. Instituto

Peruano de Energía Nuclear. ISSN 1684-1662

Gosling, FG. (1999) The Manhattan Project: Making the Atomic Bomb. (pp. 66). USA. Diane Publishing. ISBN 0788178806.

Hall, P.,Lundell, G.,Mattsson, A.,Wiklund, A.,Holm, L.,Lidberg, M.,Boice, JD.,Berg, G.,Bjelkengren, G.,Ericsson, B.,Hallquist, A. and Tennvall, J. (July 4, 1992).Leukaemiaincidenceafter iodine-131 exposure. TheLancet. Vol. 340 (8810). 1-4

INEI (1996).Proyecciones departamentales de la población 1995-2015. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima, Perú. Recuperado de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0015/N00.htm

IPEN (2006) Manual de Organización y Funciones del Instituto Peruano de Energía Nuclear. Resolución N° 146-06-IPEN/PRES. Diario Oficial El Peruano, Normas Legales. Año XXIII (9678). 334415.

IPEN-CNEA, (1981). Evaluación de la zona de emplazamiento y del área de influencia del Centro Nuclear de Investigaciones del Perú.Lima, Perú. Instituto Peruano de Energía Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica.

IPEN-CNEA, (1981). Evaluación de la zona de emplazamiento y del área de influencia del Centro Nuclear de Investigaciones del Perú. Capítulo 3: Ecología.Lima, Perú. Instituto Peruano de Energía Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica.

Jay, KEB. (1956).Calder Hall: The Story of Britain´s First Atomic Power Station.(88 p)UK.Harcourt, Brace& Co.

Jibaja, E., Amiel, J., Pardo, C. y Salazar, E. (1967). Radiactividad Ambiental en 1966.Bol.JCEA, 12 (57).12-25.

Kaul, A. and Roedler, HD. (1980).Radioiodine: biokinetics, mean dose and dose distribution. Radiat.Environ. Biophys.18(3).185-95.

Lewis, EB.(1959).Thyroid Radiation Doses from Fallout.Proc. Natl. Acad. Sci. (45). 894.

MEM (1997).Reglamento de Seguridad Radiológica. Ministerio de Energía y Minas. Decreto Supremo N° 009-97-EM. Diario Oficial El Peruano, Normas Legales. Año XIV. 149597-607.

MEM (2002).Reglamento de Protección Física de Materiales e Instalaciones Nucleares. Ministerio de Energía y Minas. Decreto Supremo N° 014-2002-EM. Diario Oficial El Peruano, Normas Legales. Año XX (7976). 221811-16.

MEM (2003).Reglamento de Autorizaciones, Fiscalización, Control, Infracciones y Sanciones de la Ley N° 28028 – Ley de Regulación del Uso de Fuentes de Radiación Ionizante. Ministerio de Energía y Minas. Decreto Supremo N° 041-2003-EM. Diario Oficial El Peruano, Normas Legales. Año XXI (8573).256958-71

Moore, D. (2000) Estadística Básica Aplicada. (pp. 10-11). Madrid, España. Editorial Antoni Bosh.

Nishizawa, K., Hamada, N. and Sakuma S. (1983).Monitoring of I-125 contamination in vivo by analysis of the saliva.Radioisotopes 32(8). 364-71.

OIEA (1979).Seguridad en el emplazamiento de centrales nucleares. Colección Seguridad N° 50-C-S. Colección Normas de Seguridad. (pp. 46). Viena, Austria. Organismo Internacional de Energía Atómica.

OIEA (1986) Atmospheric dispersion Models for Application in Relation to Radionuclide Releases – A Review. IAEA TECDOC 379. Viena, Austria. Organismo Internacional de Energía Atómica.

OIEA (2000) Método para el desarrollo de la preparación de respuesta a emergencias nucleares o radiológicas. IAEA-TECDOC 953. Viena, Austria. Organismo Internacional de Energía Atómica.

Oliver,LL., Ballad, RV. and Manuel, OK. (1982).I-129 in Missouri thyroids.Health Phys. 42(4).425-32.

ONU (1987).Convención sobre la protección física de los materiales

nucleares.UnitedNations. Treaty Series. Vol. 1456 (24631). 152-160.

Osores, JM. (2006).Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental 2006 – Centro Nuclear RACSO. Documento Técnico DT06-001-COAM. Departamento de Control Ambiental. Lima, Perú. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Lima, Perú.

Osores, JM. y Jara, R. (2013). Monitoreo radiológico ambiental debido al accidente nuclear de Fukushima. Informe Científico Tecnológico 2012. Instituto Peruano de Energía Nuclear. 171-174.

Poquioma, RE. (2005).El Cáncer como problema de Salud Pública. Minsa 2005. Lima, Perú. Ministerio de Salud. Lima.

Santisteban, AS. (2001).Cáncer en el Perú del 2000: Hechos, cifras, realidades. Revista Diagnóstico. Vol. 40 (6).

Szklo, M. y Nieto, J. (2003). Epidemiología Intermedia. (pp. 18). La Habana, Cuba. EdicionesDíaz Santos.

Sobolev, G. and Voigt, G. (1996).Estimation of I-131 thyroid doses for the evacuees from Pripjat.Radiat.Environ.Biophys. 35(2).81-87.

Suman, F., Easterly, DG.and Baratta, EJ. (1982).Quantitative determination of I-131, Cs-137 and Ba-140 in milk: collaborative studies. J. Assoc. Off. Anal. Chem 65(5). 1039-43.

Walsh Perú (2011).Estudio de Impacto Ambiental para la Perforación Exploratoria en el Lote Z-35: Resumen Ejecutivo. Lima, Perú. Walsh Perú S.A.

Vallenas, G. (2009).La Mortalidad en el Perú. Lima, Perú. Instituto Nacional de Estadística e Informática