

## **Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile.**

**Informe Final**

Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN)

Agosto 2018

21399 / IIT-004 v. 0B

No se permite la reproducción total o parcial de este documento, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de. IDOM, CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE, S.A.U.

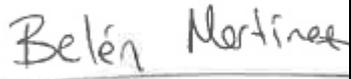
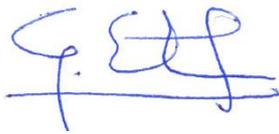
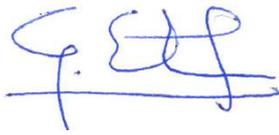
Copyright © 2018, IDOM CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE, S.A.U




---

**Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile.  
Informe Final**

---

Redactado:	Revisado:	Aprobado:
<i>Firma</i>  	<i>Firma</i> 	<i>Firma</i> 
<i>Nombre</i> Sara del Hoyo (SHG) / Belén Martínez (BMC)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)
<i>Fecha</i> 02/08/2018	<i>Date</i> 03/08/2018	<i>Date</i> 03/08/2018

Área	Encargo	Informe	Versión	CD
NS - MA	21399	IIT-004	0B	07.03

*En blanco intencionadamente*

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

## TABLA DE VERSIONES

<i>Versión</i>	<i>Fecha</i>	<i>Objeto de la versión</i>
0A+	Julio 2018	Edición inicial
0B	Agosto 2018	Incorporación de comentarios de la CCHEN

## MODIFICACIONES RESPECTO A LA VERSIÓN ANTERIOR

--

## LISTA DE PENDIENTES

<i>No.</i>	<i>Apartado</i>	<i>Descripción</i>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

*En blanco intencionadamente*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCE</b> .....	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA</b> .....	<b>4</b>
3.1.	Centrales termoeléctricas .....	5
3.1.1.	Térmicas convencionales .....	5
3.1.2.	Ciclo combinado .....	7
3.2.	Centrales hidroeléctricas .....	9
3.3.	Centrales fotovoltaicas.....	11
3.4.	Centrales eólicas .....	13
<b>4.</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE CADA TECNOLOGÍA SOBRE EL MEDIO AMBIENTE</b> .....	<b>15</b>
4.1.	Centrales termoeléctricas .....	15
4.1.1.	Centrales termoeléctricas convencionales a carbón.....	15
4.1.2.	Centrales termoeléctricas de ciclo combinado a gas natural.....	16
4.2.	Centrales hidroeléctricas .....	17
4.3.	Centrales fotovoltaicas.....	18
4.4.	Centrales eólicas .....	19
<b>5.</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE CADA TECNOLOGÍA SOBRE LAS PERSONAS</b> .....	<b>21</b>
5.1.	Centrales termoeléctricas .....	21
5.1.1.	Centrales termoeléctricas convencionales a carbón.....	21
5.1.2.	Centrales termoeléctricas de ciclo combinado a gas natural.....	22
5.2.	Centrales hidroeléctricas .....	22
5.3.	Centrales fotovoltaicas.....	22
5.4.	Centrales eólicas .....	23
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS IMPACTOS FRENTE A LA GENERACIÓN NUCLEOELÉCTRICA</b> .....	<b>24</b>
6.1.	Cambio climático.....	27
6.2.	Acidificación terrestre.....	28
6.3.	Eutrofización del agua .....	29
6.4.	Toxicidad humana.....	30
6.5.	Formación fotoquímica de ozono .....	32
6.6.	Radiación .....	33
6.7.	Ocupación del terreno.....	34
6.8.	Disminución de recursos minerales.....	35

6.9.	Disminución de recursos fósiles .....	36
<b>7.</b>	<b>RESUMEN DEL ESTUDIO PARA LA IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE POSIBLES EFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA E IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DE POTENCIA EN CHILE .....</b>	<b>38</b>
7.1.	Impactos ambientales de la generación nuclear de potencia.....	38
7.1.1.	Descripción de la generación de energía eléctrica con origen nuclear.....	38
7.1.2.	Resultados del Análisis de Ciclo de Vida .....	41
7.2.	Efectos de la generación nuclear de potencia en Chile y medidas técnicas y administrativas aplicables .....	46
7.2.1.	Variables ambientales del territorio chileno.....	46
7.2.2.	Efectos sobre el ecosistema y los recursos .....	61
7.2.3.	Efectos sobre la salud humana .....	69
7.2.4.	Medidas técnicas y administrativas aplicables.....	76
7.3.	Comparativa con otras tecnologías de generación eléctrica.....	78
7.3.1.	Breve descripción de otras tecnologías eléctricas .....	78
7.3.2.	Tabla comparativa con otras tecnologías eléctricas .....	80
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>86</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1.	Centrales de generación eléctrica consideradas .....	5
Tabla 6-1.	Estudios consultados para elaborar la comparativa .....	24
<b>Tabla 6-2.</b>	<b>Comparativa de ACV de otras fuentes de generación de electricidad .....</b>	<b>26</b>
Tabla 7-1.	Categorías de impacto agrupadas según las categorías de daño. ....	42
Tabla 7-2.	Regiones propuestas para la descripción de las variables ambientales .....	46
Tabla 7-3.	Clasificación climática por macrozonas .....	46
<b>Tabla 7-4.</b>	<b>Poblaciones publicadas por el INE para el año 2017.....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 7-5.</b>	<b>Características del sector agropecuario en Chile, Censo 2007 [34].....</b>	<b>59</b>
Tabla 7-6.	Actividad ganadera en las zonas de estudio .....	60
Tabla 7-7.	Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	61
Tabla 7-8.	Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	62
Tabla 7-9.	Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	63
Tabla 7-10.	Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	64

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

Tabla 7-11. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	65
Tabla 7-12. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	66
Tabla 7-13. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	67
Tabla 7-14. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	68
Tabla 7-15. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	70
Tabla 7-16. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	71
Tabla 7-17. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	72
Tabla 7-18. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	73
Tabla 7-19. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	74
Tabla 7-20. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	75
Tabla 7-21. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear .....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Generación de electricidad [4] .....	5
Figura 3-2. Esquema del funcionamiento de central térmica convencional .....	7
Figura 3-3. Esquema del funcionamiento de una central de ciclo combinado .....	8
Figura 3-4. Esquema del funcionamiento de una central hidroeléctrica de bombeo .....	10
Figura 3-5. Esquema del funcionamiento de una central hidroeléctrica a pie de presa .....	11
Figura 3-6. Esquema de obtención de energía eléctrica por radiación solar .....	12
Figura 3-7. Esquema de obtención de energía mediante aerogeneradores .....	14
Figura 6-1. Comparativa de la categoría cambio climático .....	28
Figura 6-2. Comparativa de la categoría de impacto de acidificación terrestre .....	29
Figura 6-3. Comparativa de la categoría de impacto eutrofización del agua .....	30
Figura 6-4. Comparativa de la categoría toxicidad humana .....	31
Figura 6-5. Comparativa de la categoría de impacto formación fotoquímica de ozono .....	32
Figura 6-6. Comparativa de la categoría de impacto radiación .....	33
Figura 6-7. Comparativa de la categoría de impacto ocupación del terreno (m <sup>2</sup> *a) .....	35

Figura 6-8. Comparativa de la categoría de disminución de recursos minerales .....	36
Figura 6-9. Comparativa de la categoría de disminución de recursos fósiles .....	37
Figura 7-1. Esquema básico de un reactor tipo PWR (LWR). .....	39
Figura 7-2. Esquema básico de un reactor tipo SMR. ....	39
Figura 7-3. Esquema básico de un reactor tipo HWR.....	40
Figura 7-4. Puntuación única para las tecnologías evaluadas .....	43
<b>Figura 7-5. Resultados normalizados de las categorías de impacto para cada tipo de tecnología. CA= Ciclo abierto / CC= Ciclo Cerrado .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 7-6. Impacto de la desertificación y la erosividad en el territorio [25] y [26] .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 7-7. Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) [24] .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 7-8. Contribución de las fuentes a la generación nacional de contaminantes (2017) [24].....</b>	<b>53</b>
Figura 7-9. Zonas Saturadas por la contaminación atmosférica [24] .....	54
Figura 7-10. Zonas destacadas en biodiversidad .....	56
<b>Figura 7-11. Estado de los ecosistemas terrestres por región, 2015 [31] .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 7-12. Porcentaje de especies clasificadas, 2015 [31].....</b>	<b>57</b>
Figura 7-13. Comparativa de dosis de radiación debida a causas artificiales o antropogénicas [36] [37] [38]. .....	69

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
ACV	Análisis Ciclo de Vida
BAT	<i>Best Available Techniques</i>
CA	Ciclo Abierto
CC	Ciclo Cerrado
CCHEN	Comisión Chilena de Energía Nuclear
COP	Contaminantes Orgánicos Persistentes
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
COVNM	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
DGA	Dirección General de Aguas
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HWR	Heavy Water Reactor

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
LWR	Light Water Reactor
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PNP	Plan Nuclear de Potencia
PWR	Pressure Water Reactor
SPPC	Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes
UV	Ultra Violeta

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

*En blanco intencionadamente*

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde su creación en 1965, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) tiene como misión investigar, desarrollar y controlar las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, generando valor y bien público, y asegurando la protección del medioambiente y la seguridad de las personas. Entre todas las posibles aplicaciones, destaca la de generación de energía eléctrica; la posibilidad de una Plan Nuclear de Potencia (PNP) lleva varios años en discusión y evaluación en Chile.

Así pues, la CCHEN, en su calidad de organismo asesor del estado en materias relacionadas con los usos pacíficos de la energía nuclear, ha recibido el mandato de liderar el desarrollo de los estudios requeridos para que, durante el próximo proceso de evaluación de la Política Energética Nacional, la energía nuclear pueda ser considerada dentro de las opciones a evaluar para la matriz energética nacional.

Dentro de los temas relevantes a ser considerados, se encuentra el poder determinar y evaluar qué impactos ambientales están asociados a la generación de la energía nuclear de potencia y como esta se compara respecto a otras tecnologías de generación eléctrica.

Es necesario el empleo de enfoques multidisciplinarios de diversas áreas de conocimiento para poder llegar a comprender, medir, cuantificar los impactos ambientales que se generan por las actividades humanas y posteriormente traducirlos con la mayor precisión posible a un lenguaje común que permita entender y comparar las distintas variables que se presentan.

Dentro del marco establecido por la Política Energética de Chile desarrollada a través del Programa Participativo Energía 2050 se promueve la aplicación del enfoque del ciclo de vida para incentivar un sector energético compatible con el medio ambiente. Es en este contexto el que toma fuerza el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), herramienta de gestión ambiental reconocida internacionalmente – Norma ISO 14040 [1] y Norma ISO 14044 [2]- utilizada para identificar de forma objetiva y rigurosa los impactos medioambientales de un producto, proceso o actividad. El ACV tiene en cuenta distintas categorías de impacto en función de las características del estudio. Esto permite tener una visión más completa del impacto que genera en este caso el proceso de generación nucleoelectrónica.

Para poder determinar el impacto medioambiental sobre el entorno de una actividad industrial, concretamente, de una central nuclear de potencia es necesario llevar a cabo un análisis de distintas variables ambientales que conforman el territorio. Una vez estudiada la situación

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

ambiental en la que se encuentra el territorio chileno respecto a las variables ambientales seleccionadas, es preciso hacer una descripción de cuál es la influencia sobre dichas variables estudiadas y si se producen grandes interferencias o no por el desarrollo de la actividad industrial en cuestión.

Con el fin de mitigar los efectos sobre el medio de estas tecnologías, a lo largo de los años, se han ido recopilando medidas administrativas y legales y buenas prácticas en el sector de generación nucleoelectrica. Por lo que la evaluación de los impactos sobre el medio y la identificación previa de las medidas existentes para controlar los impactos es una buena estrategia para procurar provocar la menor incidencia sobre el medio.

Si bien es cierto que un análisis previo de los impactos de cualquier actividad industrial permite resaltar aquellos que se producen en mayor proporción, la comparación con otras actividades es lo que realmente pone en relieve y contextualiza el desempeño ambiental de la actividad estudiada. Los procesos de comparación entre distintos estudios de análisis de ciclo de vida deben realizarse asegurando la comparabilidad entre los mismos, siempre teniendo en cuenta que aun existiendo una normativa estandarizada para elaborarlos existe cierta incertidumbre que depende de la calidad de los datos de partida, toma de decisiones en el cálculo, asignaciones, etc. inherentes a cualquier ACV. Teniendo en cuenta todas estas particularidades, la comparación entre estudios de ACV de otras tecnologías de generación eléctrica permite destacar los puntos fuertes de la tecnología nucleoelectrica frente a otras, poniendo en valor esta alternativa.

Para abordar este proceso, la CCHEN ha contratado a IDOM, mediante la licitación referencia ID: 872-204-LE17 "Identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia", un servicio de asesoría para la identificación y evaluación que tendría la incorporación de la generación nucleoelectrica en el país.

Este documento surge como el tercer informe (Informe Final) de los tres desarrollados y entregados a satisfacción de la CCHEN a lo largo del proyecto, además de la primera entrega del plan de trabajo.

## **2. OBJETIVOS Y ALCANCE**

Los objetivos del presente informe final se desarrollan en los siguientes puntos:

- 1) Recopilar y resumir la información resultante de los informes 1 y 2. Los objetivos de dichos informes consistieron en:
  - a. Informe 1: Identificar, definir y caracterizar las potenciales emisiones y descargas para la generación eléctrica con origen nuclear a través del ACV, incluyendo una breve descripción de las tecnologías nucleares estudiadas, el ciclo de combustible nuclear y la vida de una central nuclear.
  - b. Informe 2: Descripción general del territorio chileno atendiendo a distintas variables ambientales, estudio de los posibles impactos de una central nuclear sobre las personas y el medioambiente según dichas variables y análisis de las principales referencias internacionales en materia de mitigación de los efectos adversos de las centrales nucleares.
- 2) Desarrollar una comparativa de los resultados del ACV de las tecnologías de generación nucleoelectrónica frente a los de otras tecnologías de generación eléctrica.

Con la intención de reunir la información de los anteriores informes, en primer lugar, se incluyen de forma esquemática las descripciones y las principales características de las tecnologías de generación nucleoelectrónica estudiadas. A continuación, se incluyen los resultados obtenidos del ACV para cada una de las tecnologías.

Una vez estudiados los impactos de la actividad de estas tecnologías durante su ciclo de vida, se recogen los efectos de dichos impactos en el medio del entorno chileno, atendiendo a sus características y variables ambientales. De cara a poder mitigar estos impactos y controlar las emisiones propias de la actividad, se recoge una serie de medidas técnicas y administrativas de aplicación en el sector.

Por último, se lleva a cabo una comparativa con otras tecnologías de generación eléctrica con la intención de poder contextualizar los impactos producidos por la generación nucleoelectrónica. El análisis comparativo se realiza frente a las tecnologías térmicas convencionales, ciclo combinado y renovables como hidroeléctricas, eólicas y fotovoltaicas, intentando recoger el escenario de las tecnologías más empleadas de carácter fósil y de origen renovable.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

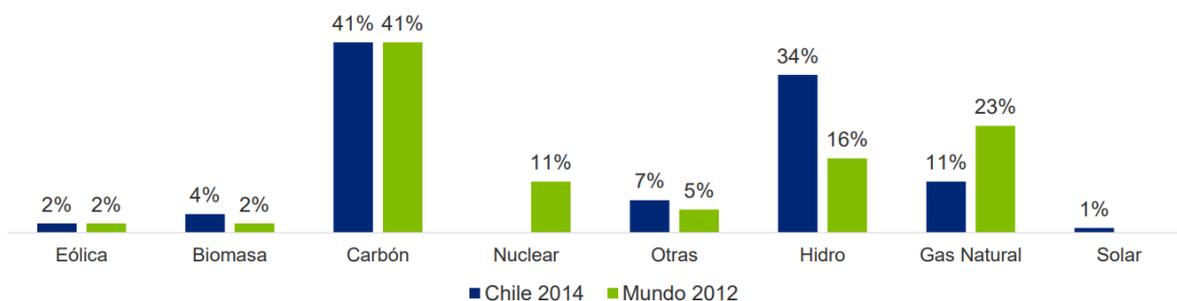
La creciente demanda de recursos eléctricos para abastecer a una población en desarrollo exige una evolución en las tecnologías generadoras de la misma. El Banco Mundial se ha comprometido a ayudar a los países a garantizar el acceso a energía asequible, confiable y sostenible para todos, como se plantea en el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta labor es central para cumplir el mandato principal del Banco Mundial, a saber: poner fin a la pobreza e impulsar la prosperidad compartida.

El acceso a un nivel suficiente y sostenible de energía también resulta esencial para lograr otros ODS, y constituye el eje de los esfuerzos para hacer frente al cambio climático. De forma que el desarrollo de tecnologías de generación eléctrica con una baja contribución de gases de efecto invernadero supone una buena alternativa para afrontar los ODS. A lo largo de todo el mundo, unos 1.000 millones de personas viven sin electricidad, cientos de millones viven con un suministro eléctrico insuficiente o poco confiable. Al mismo tiempo, aproximadamente 3.000 millones de personas utilizan combustibles como leña u otra biomasa para cocinar o calefaccionar sus viviendas, lo que genera contaminación en espacios abiertos y cerrados que tiene impactos generalizados en la salud.

La nueva dinámica del sector de la energía —redes modernas alimentadas con proporciones cada vez mayores de energía renovable y tecnologías bajas en emisiones de gases de efecto invernadero; enfoques programáticos amplios que están dando lugar a una expansión considerable en el acceso a la energía; el compromiso de adoptar medidas a nivel municipal, subnacional, nacional e internacional, y la participación sostenida del sector privado y la continuidad de sus inversiones— está generando nuevas e interesantes oportunidades [3].

A nivel mundial, existe una tendencia en la que la generación eléctrica mediante tecnologías térmicas convencionales a carbón prepondera sobre el resto de tecnologías. Sin embargo, la tecnología hidroeléctrica presenta la segunda mayor contribución sobre la matriz mundial. En el territorio chileno la tendencia de la generación eléctrica coincide con la tendencia mundial, siendo la tecnología térmica a carbón la que prevalece sobre las demás [4].

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*



**Figura 3-1. Generación de electricidad [4]**

Considerando la tendencia a nivel mundial y a nivel chileno, las tecnologías escogidas para hacer el estudio comparativo de los impactos ambientales son, por un lado, aquellas de origen no renovable como las térmicas convencionales y de ciclo combinado y, por otro, de origen renovable como las hidroeléctricas, eólicas y fotovoltaicas. En la Tabla 3-1, se recogen las tecnologías escogidas.

**Tabla 3-1. Centrales de generación eléctrica consideradas**

1	Central térmica convencional a carbón
2	Central de ciclo combinado a gas natural
3	Central de ciclo combinado a gas natural con captura de CO <sub>2</sub>
4	Central hidroeléctrica
5	Central fotovoltaica
6	Central eólica

### 3.1. Centrales termoeléctricas

#### 3.1.1. Térmicas convencionales

Las centrales térmicas convencionales producen energía eléctrica a partir de combustibles fósiles como el carbón, fuel oil o gas natural. Además, utilizan tecnologías clásicas para la

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

producción de electricidad, es decir, mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor. El funcionamiento de una central térmica convencional es el mismo para todas independientemente del combustible que se emplee para la producción de la energía.

Los principales componentes de una central térmica convencional se detallan a continuación:

- **Caldera** → En este espacio el agua se convierte en vapor gracias a la combustión del combustible empleado en la cual se generan gases a muy alta temperatura que al entrar en contacto con el agua líquida cambian el estado de la misma. Esta transformación se produce a lo largo de unos serpentines, que son una especie de cañerías en las que se produce el intercambio de calor entre los gases de la combustión y el agua líquida. Los residuos sólidos de esta combustión caen a un depósito llamado cenicero para ser posteriormente transportados a un vertedero. Las partículas finas y los humos se hacen pasar por precipitadores y equipos de desulfuración, con el objeto de retener un elevado porcentaje de los contaminantes que en caso contrario llegarían a la atmósfera a través de la chimenea.
- **Turbina de vapor** → La turbina recoge el vapor de agua, que mediante una serie de presiones mueve el eje que atraviesa la turbina. La turbina suele estar formada de varias partes (alta, media y baja presión) para aprovechar todo el vapor de agua. El eje de esta turbina mueve el rotor del generador eléctrico.
- **Generador** → El generador es el encargado de recoger la energía mecánica mediante inducción electromagnética generada por el eje que se encuentra en la turbina. La energía mecánica rotatoria es convertida en electricidad de media tensión y alta intensidad. Con el objetivo de disminuir las pérdidas durante el transporte a los puntos de consumo, la tensión de la electricidad generada es elevada en un transformador antes de ser enviada a la red general mediante las líneas de transporte de alta tensión. Después de accionar las turbinas, el vapor de agua se convierte en líquido en el condensador. El agua que refrigera el condensador proviene de un río o del mar, y puede operar en circuito cerrado, es decir, transfiriendo el calor extraído del condensador a la atmósfera mediante torres de refrigeración o, en circuito abierto, descargando dicho calor directamente a su origen [5].

Una de las principales diferencias entre los diferentes tipos de centrales termoeléctricas convencionales es el tratamiento del combustible. El carbón requiere de una trituración previa para ser empleado, mientras que en el caso del fuel oil se calienta para que sea más fácil

manipularlo y en el caso especial del gas natural que no se almacena, sino que llega a la central a través de gaseoductos [6].

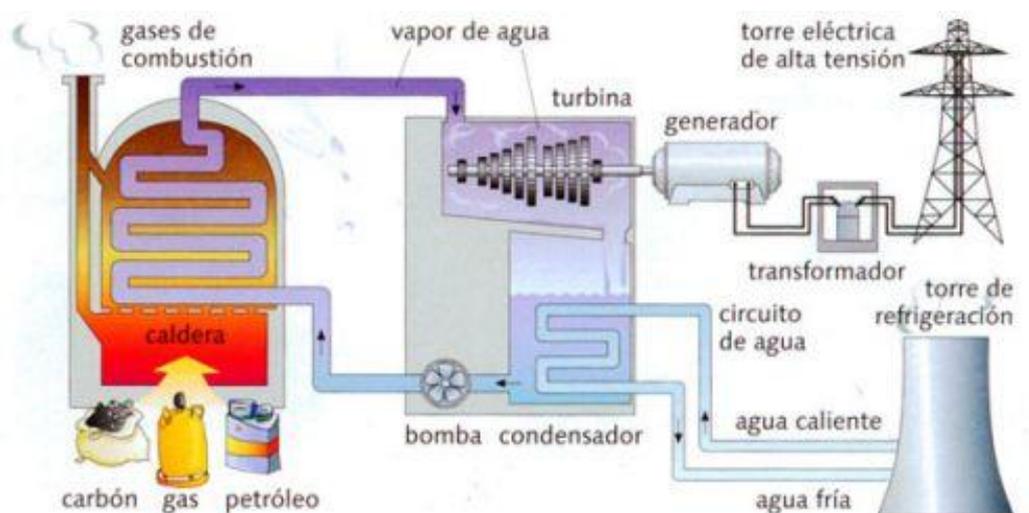


Figura 3-2. Esquema del funcionamiento de central térmica convencional

### 3.1.2.Ciclo combinado

Una central térmica de ciclo combinado es aquella que genera la electricidad mediante el uso de dos turbinas: un turbo grupo de gas y un turbo grupo de vapor. Esto quiere decir que superpone dos tipos de ciclo que son el ciclo de Bryton, en el caso de la turbina de gas, y el ciclo de Rankine, en el caso de la turbina de vapor.

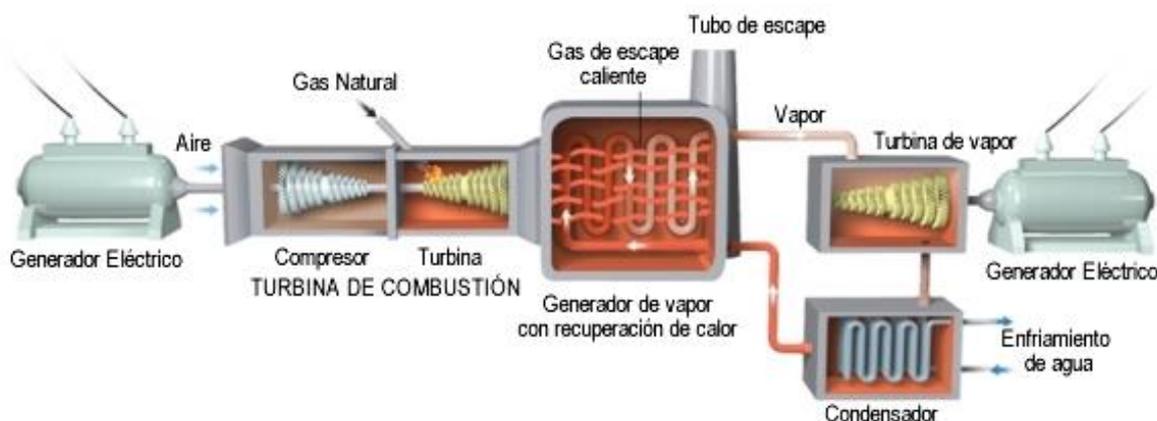
Las partes principales que conforman una planta de ciclo combinado se describen a continuación:

- **Turbina de gas** → Consta, a su vez de tres partes, que son el compresor que inyecta el aire a presión para la combustión del gas, la cámara de combustión donde se mezclan el aire y el gas y, por último, la turbina de gas donde se produce la expansión de los gases. La energía se transforma, a través de los álabes, en energía mecánica de rotación que se transmite a su eje. Parte de esta potencia es consumida al arrastrar el compresor (aproximadamente los dos tercios) y el resto mueve el generador eléctrico, que está acoplado a la turbina de gas para la producción de electricidad. El rendimiento de la turbina aumenta con la temperatura de entrada de los gases, que alcanzan unos 1.300 °C, y que salen de la última etapa de expansión en la turbina a unos 600 °C. Por tanto, para aprovechar la energía que todavía tienen, se conducen a la caldera de recuperación para su utilización.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

- **Caldera de recuperación** → Es una caldera convencional donde se aprovechan los gases de la turbina en un ciclo de agua-vapor. La caldera tiene los mismos componentes que una caldera convencional (precalentador, economizador, etc.), y, en ella, los gases de escape de la turbina de gas transfieren su energía a un fluido, que en este caso es el agua, que circula por el interior de los tubos para su transformación en vapor de agua.
- **Turbina de vapor** → Se trata de una turbina, habitualmente de tres cuerpos, basada en tecnología convencional. El vapor se expande a esta turbina que acciona, a través de su eje, el rotor de un generador eléctrico que, a su vez, transforma la energía mecánica rotatoria en electricidad de media tensión y alta intensidad. A fin de disminuir las pérdidas de transporte, al igual que ocurre con la electricidad producida en el generador de la turbina de gas, se eleva su tensión en los transformadores, para ser llevada a la red general mediante las líneas de transporte. El vapor saliente de la turbina pasa al condensador para su licuación mediante agua fría que proviene de río o de mar. El agua de refrigeración se devuelve posteriormente a su origen, río o mar (ciclo abierto), o se hace pasar a través de torres de refrigeración para su enfriamiento, en el caso de ser un sistema de ciclo cerrado. Conviene señalar que el desarrollo actual de esta tecnología tiende a acoplar las turbinas de gas y de vapor al mismo eje, accionando así conjuntamente el mismo generador eléctrico. [5]

Tradicionalmente, las centrales de ciclo combinado emplean gas natural como combustible para la generación de energía, sin embargo, existen las centrales de gasificación integrada con ciclo combinado que se describen a continuación, las cuales emplean otros combustibles.



**Figura 3-3. Esquema del funcionamiento de una central de ciclo combinado**

### 3.2. Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones que permiten aprovechar la energía potencial gravitatoria (masa de agua a una cierta altura) contenida en el agua de los ríos, al convertirla en energía eléctrica mediante turbinas hidráulicas acopladas a generadores eléctricos.

Las centrales hidroeléctricas admiten dos tipos de clasificaciones en función de su tamaño y de su localización.

En función de su tamaño:

- Centrales hidroeléctricas de gran potencia
- Minicentrales hidroeléctricas
- Microcentrales hidroeléctricas

En función de su localización:

- **Centrales hidroeléctricas de bombeo:** Una central hidroeléctrica de bombeo es un tipo especial de central hidroeléctrica que tiene dos embalses. El agua contenida en el embalse situado en el nivel más bajo —embalse inferior—, es bombeada durante las horas de menor demanda eléctrica al depósito situado en la cota más alta —embalse superior—, con el fin de turbinarla, posteriormente, para generar electricidad en las horas de mayor consumo eléctrico. Por tanto, estas instalaciones permiten una mejora en la eficiencia económica de la explotación del sistema eléctrico al almacenar electricidad en forma de agua embalsada en el depósito superior. Constituye en la actualidad la forma más económica de almacenar energía eléctrica.

Durante las horas en que la demanda de energía eléctrica es mayor, la central de bombeo funciona como cualquier central hidroeléctrica convencional: el agua que previamente es acumulada en el embalse superior cerrado por una presa llega a través de una galería de conducción a una tubería forzada, que la conduce hasta la sala de máquinas de la central eléctrica. Para la regulación de las presiones del agua entre las conducciones anteriores se construye en ocasiones una chimenea de equilibrio. En la tubería forzada, el agua va adquiriendo energía cinética (velocidad) que, al chocar con los álabes de la turbina hidráulica, se convierte en energía mecánica rotatoria.

Esta energía se transmite al generador para su transformación en electricidad de media tensión y alta intensidad. Una vez elevada su tensión en los transformadores es enviada a la red general mediante líneas de transporte de alta tensión. El agua, una vez que ha generado la electricidad, circula por el canal de desagüe hasta el embalse inferior, donde queda almacenada.

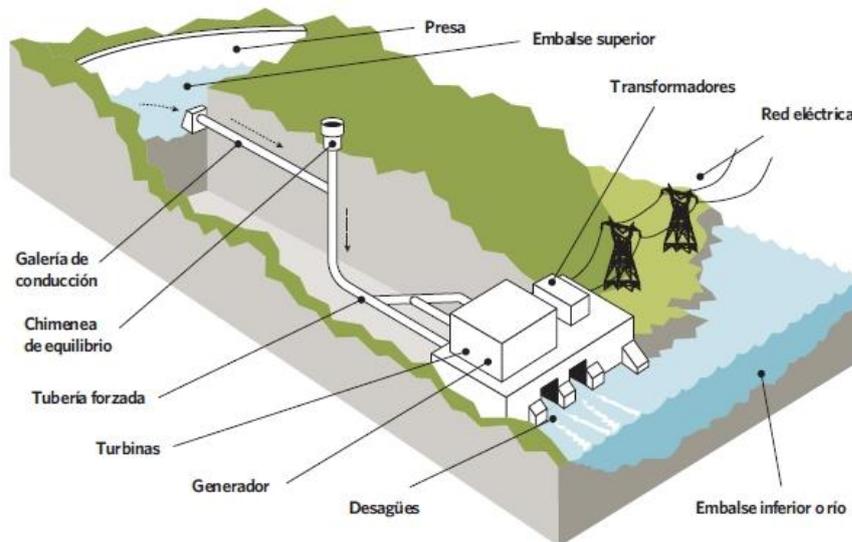
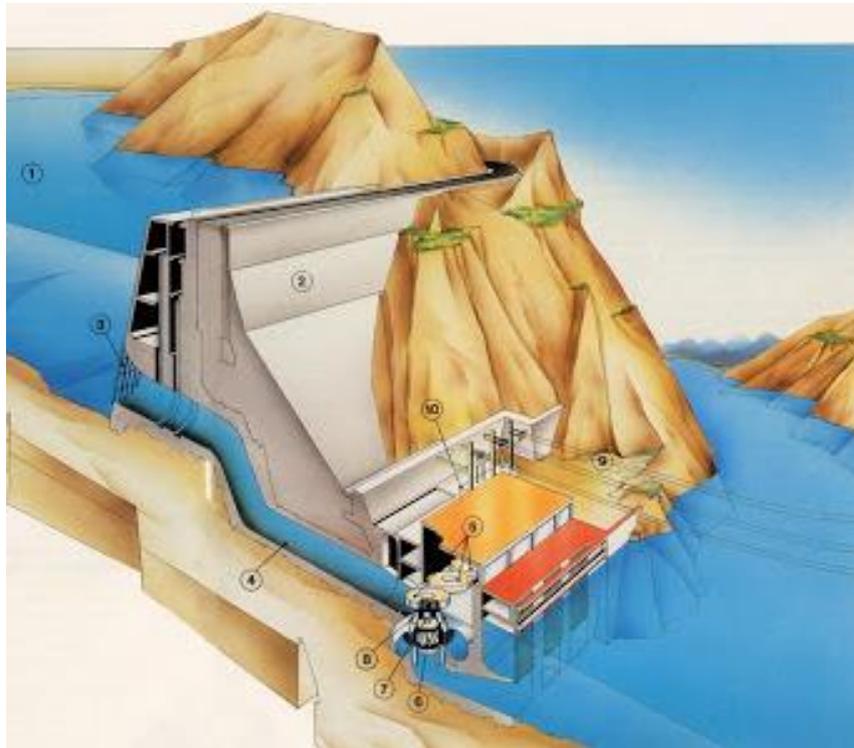


Figura 3-4. Esquema del funcionamiento de una central hidroeléctrica de bombeo

- **Centrales hidroeléctricas a pie de presa:** La presa, situada en el lecho de un río, acumula artificialmente un volumen de agua para formar un embalse, lo que permite que el agua adquiera una energía potencial (masa a una cierta altura) que luego se transforma en electricidad. Para ello, se sitúa aguas arriba de la presa, o en sus proximidades, una toma de agua protegida por una rejilla metálica con una válvula que permite controlar la entrada del agua en la galería de presión, previa a una tubería forzada que conduce finalmente el agua hasta la turbina situada en la sala de máquinas de la central. El agua a presión de la tubería forzada va transformando su energía potencial en cinética, es decir, va perdiendo altura y adquiriendo velocidad. Al llegar a las máquinas, actúa sobre los álabes de la turbina hidráulica, transformando su energía cinética en energía mecánica de rotación. El eje de la turbina está unido al del generador eléctrico que, al girar, convierte la energía rotatoria en corriente alterna de media tensión y alta intensidad. Mediante transformadores, es convertida en corriente de baja intensidad y alta tensión, para ser enviada a la red general mediante las líneas de

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

transporte. Una vez que ha cedido su energía, el agua es restituida al río, corriente abajo de la central, a través del canal de desagüe [5].



**Figura 3-5. Esquema del funcionamiento de una central hidroeléctrica a pie de presa**

- **Centrales hidroeléctricas de pasada:** no almacenan agua, sino que aprovechan el flujo del caudal. El principal inconveniente es que en épocas de sequía puede que no generen energía.

### 3.3. Centrales fotovoltaicas

El esquema general de una central fotovoltaica se define a continuación:

El elemento básico de una central fotovoltaica es el conjunto de células fotovoltaicas, que captan la energía solar, transformándola en corriente eléctrica continua mediante el efecto fotoeléctrico. Están integradas, primero, en módulos y luego se forman con ellos los paneles fotovoltaicos. Lógicamente, la producción de electricidad de dichas células depende de las condiciones meteorológicas existentes en cada momento, fundamentalmente de la insolación. Dichas condiciones son medidas y analizadas con la ayuda de una torre meteorológica. Como la energía

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

eléctrica que circula por la red de transporte lo hace en forma de corriente alterna, la corriente continua generada en los paneles solares debe ser transformada a corriente alterna. Es conducida, entonces, primeramente, a un armario de corriente continua, para ser convertida en corriente alterna por medio de un inversor y ser finalmente transportada a un armario de corriente alterna.

Posteriormente, la energía eléctrica producida pasa por un centro de transformación donde se adapta a las condiciones de intensidad y tensión de las líneas de transporte para su utilización en los centros de consumo [5].



**Figura 3-6. Esquema de obtención de energía eléctrica por radiación solar**

En función de la composición de los paneles fotovoltaicos existen diferentes tipos:

- **Paneles de silicio monocristalino:** Para la obtención de estos paneles se parte de celdas creadas a partir de un cristal de silicio. Se trata de la tipología de panel más eficiente, sin embargo, el proceso de obtención del panel es complejo elevando sus costes de manufactura.
- **Paneles de silicio policristalino:** También denominados multicristalinos. En este caso, las celdas se obtienen de cortes de un mismo lingote de silicio recristalizado. De estos cortes, se obtienen obleas muy finas que se unen para formar las celdas. Son más económicos ya que su manufactura es más sencilla que la de los paneles monocristalinos, sin embargo, su eficiencia es menor.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- **Paneles de silicio de película fina:** En este caso, el silicio es depositado mediante un proceso continuo sobre una base lisa. Como todos los casos en los que el silicio es empleado en su forma cristalina, se recubre con un polímero transparente sobre una superficie de vidrio templado en un marco metálico.
- **Paneles de silicio amorfo:** Se deposita una capa de silicio de forma homogénea en una capa sobre un sustrato determinado en lugar de emplear una estructura rígida de vidrio. Esto permite crear paneles que se adapten a superficies curvas, sin embargo, presentan una eficiencia menor que los paneles de silicio cristalino, si bien es cierto que su manufactura es más sencilla y, en consecuencia, más económica.
- **Otros paneles de película fina:** Existen otros materiales aparte del silicio que permiten crear paneles para transformar la energía solar en electricidad. Por ejemplo, se encuentran los paneles de telururo de cadmio (CdTe) y los de cobre indio selenio (CIS). El principal atractivo de estas alternativas es que pueden obtenerse reduciendo los costes de la manufactura que exigen los paneles de silicio y ofreciendo eficiencias similares a los paneles de silicio amorfo. La desventaja de estas alternativas es el uso de sustancias con un potencial tóxico relativamente alto como es el caso del cadmio, lo que exige un tratamiento especial para evitar contaminaciones al medio [7].

### 3.4. Centrales eólicas

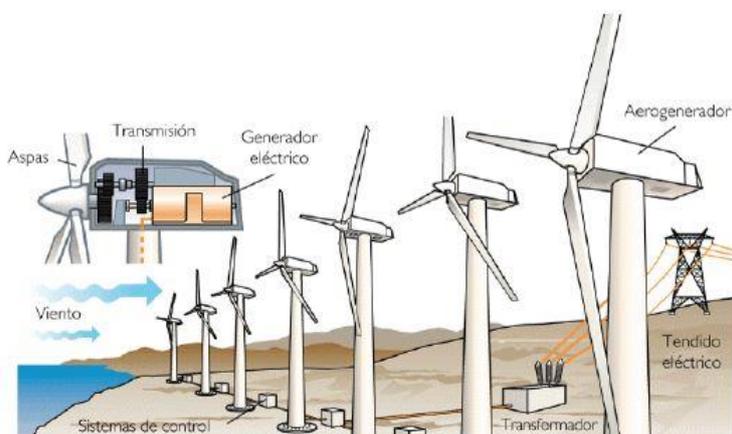
La energía eólica produce la transformación en electricidad a través de los aerogeneradores. Un aerogenerador eléctrico es un sistema que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Para ello, utiliza unas palas, que conforman la “hélice”, y que transmiten la energía del viento al rotor de un generador. Generalmente se agrupan en un mismo emplazamiento varios aerogeneradores, dando lugar a los llamados parques eólicos. Existe una gran variedad de modelos de aerogeneradores, si bien pueden agruparse en dos grandes conjuntos: los de eje vertical y los de eje horizontal. A continuación, se describe el funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal ya que se trata de los más habituales y ofrecen mayores eficiencias que los de eje vertical.

- Sobre una torre soporte se coloca una **góndola**, que aloja en su interior un generador, el cual está conectado, mediante una multiplicadora, a un conjunto de palas.
- La energía eléctrica producida por el giro del generador es transportada mediante cables conductores a un **centro de control** desde donde, una vez elevada su tensión por los

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

transformadores, es enviada a la red general mediante las líneas de transporte de alta tensión.

- Dado el carácter aleatorio de la producción de energía eléctrica por vía eólica, las centrales de este tipo deben disponer de una **fuentes auxiliar** para tener garantizado en todo momento el suministro de energía eléctrica. Debido a la altura en la que se encuentra el generador y al rozamiento que el aire produce sobre éste, es conveniente que el equipo tenga una **toma a tierra**, para evitar la electricidad estática. Asimismo, para el control de la velocidad del generador existen tecnologías que permiten regular, dentro de unos límites, las revoluciones de las palas, independientemente de la velocidad del viento [5].



**Figura 3-7. Esquema de obtención de energía mediante aerogeneradores**

## **4. IDENTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE CADA TECNOLOGÍA SOBRE EL MEDIO AMBIENTE**

### **4.1. Centrales termoeléctricas**

#### **4.1.1. Centrales termoeléctricas convencionales a carbón**

La incidencia de este tipo de centrales sobre el medio ambiente se produce de dos maneras básicas principalmente:

##### **1- Emisiones a la atmósfera**

Este tipo de emisiones provienen de la combustión de los combustibles fósiles que utilizan las centrales térmicas convencionales para funcionar y producir electricidad. La combustión de los mismos en calderas, tanto si se trata de sólidos como de líquidos derivados del petróleo, son causantes de emisiones a la atmósfera. Las emisiones generadas dependen de los quemadores para la combustión del carbón, fuel oil, etc., el aire de combustión y la mezcla previa del combustible. Las emisiones más relevantes en estos procesos son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el monóxido de carbono (CO). También presentan emisiones de material particulado (MP), mercurio, hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles, arsénico, plomo, entre otros.

##### **2- Impactos al agua**

El uso de agua para la generación de electricidad mediante tecnologías termoeléctricas es uno de los puntos críticos con respecto a la incidencia sobre el medio ambiente. El principal uso de los recursos hídricos en estas tecnologías es para los sistemas de refrigeración que condensan el vapor y eliminan el calor residual generado. La cantidad de agua requerida depende del número de reactores que presente cada planta de generación y el sistema de refrigeración que se emplee. Actualmente, para lidiar con el problema del uso de este recurso se han desarrollado sistemas de refrigeración que emplean aire en lugar de agua para eliminar el calor residual. Respecto a los sistemas tradicionales de refrigeración, existen los sistemas abiertos y los de ciclo cerrado. Los sistemas abiertos hacen pasar el agua por una serie de condensadores antes de descargar esta agua de vuelta al medio con el consecuente impacto de descargar agua a una temperatura mayor de la que se encuentra en el medio. En los sistemas de ciclo cerrado, o recirculantes, el agua es conducido por el condensador varias veces mediante el uso de una torre de refrigeración para facilitar la eliminación del calor residual por evaporación. Dicha

evaporación provoca que disminuya el volumen de agua de refrigeración además de reconcentrar las sales presentes en la misma lo que puede hacer que los circuitos del sistema se estropeen. Para evitar el deterioro de los circuitos por la elevada concentración de sales en el agua se vuelve a tomar agua del medio. Sin embargo, aunque el sistema cerrado requiera tomar determinadas cantidades de agua periódicamente para mantener las concentraciones de sales, es la técnica de refrigeración que menos recursos hídricos necesita [8].

#### **4.1.2. Centrales termoeléctricas de ciclo combinado a gas natural**

La utilización de gas natural para la generación de electricidad mediante la tecnología del ciclo combinado se encuentra dentro de la política medioambiental de un gran número de países, ya que ofrece un gran número de ventajas en comparación con el resto de tecnologías térmicas de producción eléctrica. El gas natural como cualquier otro combustible produce CO<sub>2</sub>; sin embargo, debido a la alta proporción de hidrógeno-carbono de sus moléculas, sus emisiones son un 40-50% menores de las del carbón y un 25-30% menores de las del fuel-oil. Respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub>, la propia composición del gas natural genera dos veces menos emisiones que el carbón y 2,5 veces menos que el fuel-oil. Por otro lado, el gas natural tiene un contenido en azufre inferior a las 10ppm (partes por millón) en forma de odorizante, por lo que la emisión de SO<sub>2</sub> en su combustión es 150 veces menor a la del gas-oil, entre 70 y 1.500 veces menor que la del carbón y 2.500 veces menor que la que emite el fuel-oil. El gas natural se caracteriza por la ausencia de cualquier tipo de impurezas y residuos, lo que descarta cualquier emisión de partículas sólidas, hollines, humos, etc. [9].

Sin embargo, esto no quiere decir que no se produzcan impactos al medio. Los considerados relevantes son los relacionados con la disminución de los recursos naturales por los consumos propios de la planta y los requerimientos de combustible, así como los relacionados con la calidad fisicoquímica del aire por las emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen en las calderas. Si bien es cierto que existen otros impactos significativos asociados a procesos indirectos como transportes, suministros, otros consumos, etc. estos son inherentes a cualquier actividad de producción de electricidad en mayor o menor medida [10].

Otros impactos directos son los que se producen en las turbinas de gas las cuales pueden presentar capacidades térmicas que varían desde varios cientos de kWt hasta 500 MWt. En este tipo de dispositivos se emplean principalmente combustibles gaseosos, tales como el gas natural o el producto de la gasificación de carbón u otro tipo de gases de proceso (como es el caso de las centrales de gasificación integrada de ciclo combinado, IGCC por sus siglas en inglés). La temperatura en las cámaras de combustión, que alcanza valores superiores a los 1.300°C, puede

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

producir emisiones considerables de NOx. Para las IGCC sólo se consideran relevantes las emisiones producidas en la turbina de gas (cámara de combustión), mientras que para las centrales de ciclo combinado de gas natural deben considerarse asimismo las emisiones producidas en las calderas de combustibles fósiles asociadas [11].

## **4.2. Centrales hidroeléctricas**

La generación de electricidad partiendo de fuentes renovables y, sobre todo, evitando como fuente de energía los combustibles fósiles supone un gran avance en la reducción de la contaminación al medio. Sin embargo, considerando todo el ciclo de vida de la obtención de 1kWh a partir de la energía del agua, se identifican una serie de impactos que son inherentes a esta actividad y ponen en relieve la importancia de considerar todos los aspectos ambientales.

Existen determinados efectos ambientales debido a la construcción de centrales hidroeléctricas y su infraestructura que pueden provocar impactos a los ecosistemas.

Uno de los principales puntos críticos de las centrales hidroeléctricas es el parámetro del uso del suelo. La extensión de superficie necesaria para el emplazamiento de una central depende de sus características y de la topografía de la localización. Esta ocupación del terreno genera una serie de problemas asociados como la destrucción de ecosistemas, eliminación de terreno agrícola, inmersión tierras alterando el territorio y destrucción de hábitats naturales.

Respecto a los impactos a los ecosistemas, cabe destacar los daños a los ecosistemas marinos ya que directamente por el funcionamiento de la central los peces y otros organismos del medio pueden verse heridos e incluso morir por efecto de las turbinas. Aparte del contacto directo, los ecosistemas ven alterado su equilibrio por los cambios que se pueden producir en el mismo. Por ejemplo, el hecho del estancamiento del agua para el embalse puede hacer que aumente la proporción de sedimentos y de nutrientes, que como consecuencia puede provocar un crecimiento descontrolado de algas. Por otro lado, los procesos de evaporación se dan con más velocidad en los embalses o reservorios de agua que en los cursos de los ríos. Todo esto puede afectar al ciclo de vida de la fauna, así como limitar el transporte fluvial y el transporte de materiales como nutrientes y sedimentos aguas abajo. Además, en las presas suelen existir zonas inundadas llenas de vegetación las cuales pueden llegar a emitir metano por el hecho de la descomposición de la materia orgánica. Este gas presenta un alto potencial de efecto invernadero contribuyendo así al cambio climático [12].

Los costes ambientales pueden ser evitados o reducidos a un nivel aceptable si se evalúan cuidadosamente y se implantan medidas correctivas. Por todo esto, es importante que en el momento de construir una nueva presa se analicen muy bien los posibles impactos ambientales en frente de la necesidad de crear un nuevo embalse [6].

### **4.3. Centrales fotovoltaicas**

Desde el punto de vista medio ambiental, la producción de electricidad a partir de la generación solar tiene grandes ventajas durante la obtención de la energía:

- No genera ningún tipo de emisiones atmosféricas durante la operación
- No produce efluentes líquidos durante la operación
- Evita el uso de combustibles fósiles para la obtención de electricidad

A pesar de esto, las grandes centrales termosolares pueden generar un gran impacto sobre el paisaje y necesitan grandes superficies para colocar los espejos direccionales. Cabe mencionar también que una vez han terminado su vida útil, las placas fotovoltaicas dejan residuos que deben ser tratados específicamente.

Las principales ventajas de las centrales solares se centran sobre todo en el proceso de obtención de la electricidad que, al no existir procesos de combustión, no se producen emisiones directas. Sin embargo, los impactos al medio durante todo el ciclo de vida se pueden producir por el hecho del uso de fuentes de energía de procedencia basada en combustibles fósiles para la producción de los paneles solares, materiales y otros productos. Este impacto depende del mix eléctrico de donde se consume energía, es decir, la contribución de cada uno de los tipos de generación energética que conformen la electricidad de red.

Respecto al uso del suelo, dependiendo de su localización, las plantas solares pueden provocar una degradación del suelo y pérdidas de hábitats, debido a la necesidad de una gran cantidad de extensión para la instalación de una central de ciertas proporciones. Las necesidades totales de suelo varían en función de la tecnología, la topografía de la zona y la intensidad de la radiación. En una instalación de solar fotovoltaica, las necesidades son de 2 ha/MW instalado en el caso de paneles solares policristalinos y de 5 ha/MW para paneles de capa fina.

A diferencia de los parques eólicos, las plantas solares están más restringidas en cuanto a usos simultáneos, por ejemplo, con la agricultura o la ganadería. Sin embargo, el impacto sobre el suelo podría verse minimizado si se destinasen a la implantación de huertos solares aquellas áreas más degradadas o campos de cultivo abandonados por su baja productividad. Por

supuesto, las instalaciones más pequeñas en hogares o industrias no ocasionan impacto alguno sobre el terreno al situarse normalmente en las cubiertas de las edificaciones existentes [13].

#### **4.4. Centrales eólicas**

Al tratarse de una tecnología que emplea un recurso renovable como fuente de producción de electricidad lleva asociados de manera inherente ciertos beneficios frente a otras tecnologías que dependen de combustibles fósiles. Esto no quiere decir que durante todo el ciclo de vida de la producción de electricidad no se generen impactos al medio.

En primer lugar, la manufactura de los aerogeneradores requiere del uso de tierras raras cuya extracción se limita a localizaciones mineras muy concretas. La minería de estos elementos puede llegar a ser un factor a considerar sin embargo la cantidad empleada de los mismos es reducida, además solo se produce durante la manufactura de los aerogeneradores los cuales, salvo avería o recambio, no requieren de más consumo de dichos elementos [14].

El uso del suelo por parte de las centrales de generación eléctrica a partir de aerogeneradores depende significativamente del emplazamiento de los mismos: aquellos situados en zonas llanas tienden a usar más terreno que las que se encuentran en colinas. Sin embargo, no se ocupa todo el terreno en el que se encuentran situados, necesitan un espacio entre los aerogeneradores de 5 a 10 veces el diámetro de las aspas de la turbina. De acuerdo con los resultados de una encuesta del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (EE. UU.) las centrales eólicas a gran escala tienen una eficiencia por área de entre 30 y 141 acres<sup>1</sup>/MWh (12 y 57 ha/MWh). Sin embargo, de toda el área ocupada menos de 1 acre (0,40 ha) se ve permanentemente transformado y menos de 3,5 acres/MWh (1,41 ha/MWh) es transformado temporalmente durante la construcción. Cabe destacar que una central eólica puede permitir actividades simultáneas en el propio terreno como cultivos, pastoreo, actividades de excursionismo, entre otras. Además de aprovechar el terreno donde se encuentren emplazadas las centrales eólicas, es posible aprovechar localizaciones de antiguas industrias y así minimizar el impacto por el uso del suelo.

El impacto de los aerogeneradores sobre el hábitat y la fauna del terreno se hace más notable sobre las aves y murciélagos. Recientes estudios han puesto en evidencia la muerte de pájaros y murciélagos por choques con las aspas del generador y debido al cambio de las presiones que

---

<sup>1</sup> 1 acre = 0,4046 ha

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

se producen por la acción de las hélices de la turbina, así como por la interferencia con ecosistema de la zona. Sin embargo, se ha concluido que estos efectos en la fauna no suponen una amenaza a la desaparición de las especies. En cuanto a los aerogeneradores situados mar adentro (*offshore*), los efectos sobre las aves son similares a los que se producen con los aerogeneradores en tierra (*onshore*). En el caso de los primeros, sí que puede existir un impacto sobre el medio marino, de hecho, existen estudios que sugieren que los aerogeneradores pueden promover el crecimiento de la fauna marina ya que pueden actuar como arrecifes artificiales [15].

## **5. IDENTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE CADA TECNOLOGÍA SOBRE LAS PERSONAS**

### **5.1. Centrales termoeléctricas**

#### **5.1.1. Centrales termoeléctricas convencionales a carbón**

Las centrales termoeléctricas convencionales presentan un factor crítico detallado en el apartado 4.1.1 que se trata de las emisiones a la atmósfera, resultado de la combustión de la fuente de energía empleada. Las emisiones descritas anteriormente como las más abundantes en este tipo de tecnología son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el monóxido de carbono (CO). Sin embargo, no son las únicas emisiones relacionadas, también se producen emisiones de material particulado (MP), mercurio, hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles, arsénico, plomo, entre otros. Por eso, las centrales térmicas convencionales disponen de chimeneas de gran altura que dispersan estas partículas y reducen, localmente, su influencia negativa directa sobre las personas.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno están relacionadas con la formación de smog, el cual a su vez se relaciona con enfermedades respiratorias. El material particulado (los NO<sub>x</sub> y el SO<sub>2</sub> pueden llegar a formar partículas), además de provocar reducción de la visibilidad en la atmósfera, está relacionado con bronquitis crónica y empeoramiento de cuadros de asma. Por otro lado, el mercurio puede entrar en la cadena trófica del ecosistema marino haciendo que los peces no sean recomendados para la alimentación ya que el mercurio elemental y el metilmercurio son tóxicos para el sistema nervioso central y el periférico.

Sin embargo, el principal riesgo para la salud humana es consecuencia de la contribución al cambio climático por parte de los gases de efecto invernadero que este tipo de tecnología genera. Las consecuencias de los efectos del cambio climático afectan de manera negativa a la salud humana y de manera global. De forma resumida, los daños sobre la salud humana asociados al cambio climático abarcan desde muerte por eventos meteorológicos cada vez más intensos, muertes por los efectos de olas de calor más frecuentes e intensas, entre otros. Por otro lado, es importante destacar que las consecuencias de los efectos irreversibles del cambio climático afectan de forma universal [16].

### **5.1.2. Centrales termoeléctricas de ciclo combinado a gas natural**

De acuerdo con lo descrito en el apartado 4.1.2, las emisiones de las centrales que emplean gas natural como combustible emiten menos gases de efecto invernadero y menos contaminantes atmosféricos. Sin embargo, estas emisiones no dejan de ser un factor crítico en esta tecnología por lo que los problemas descritos por las emisiones de estos gases para las tecnologías que dependen del carbón como combustible se pueden aplicar a este tipo de tecnología, siempre y cuando considerando que emiten un cierto porcentaje menor.

### **5.2. Centrales hidroeléctricas**

Como se ha descrito anteriormente, el desarrollo de tecnologías que eviten el uso de recursos fósiles como fuente para la generación de electricidad supone un gran avance en cuanto a la contribución a ciertas problemáticas ambientales y a los efectos en la salud de las personas. Sin embargo, ciertos impactos sobre el entorno son inevitables e inherentes a cualquier actividad productora.

En primer lugar, como se ha descrito anteriormente (apartado 4.2) las presas suelen presentar zonas capaces de emitir metano por el hecho de la descomposición de la materia orgánica. Este gas presenta un alto potencial de efecto invernadero contribuyendo así al cambio climático [12]. Por lo tanto, los efectos sobre la salud humana de esta fuente emisora de gases son los resultantes del cambio climático (aumento de la mortalidad por efecto de las altas temperaturas, muertes relacionadas con eventos meteorológicos extremos, agravamiento de enfermedades pulmonares por el empeoramiento de la calidad del aire, etc.)

La influencia de las centrales hidroeléctricas sobre la demografía se limita al emplazamiento de la central, ya que se han dado casos en los que ciertas comunidades han tenido que ser trasladadas a otros emplazamientos como consecuencia de la construcción de una central hidroeléctrica [17].

### **5.3. Centrales fotovoltaicas**

Al igual que la tecnología hidroeléctrica, la fuente de producción de electricidad no se trata de un combustible fósil de forma que, aunque durante todo el ciclo de vida se produzcan consumos puntuales de combustibles fósiles, no se emiten gases de efecto invernadero o contaminantes ambientales en la medida que lo hacen las centrales térmicas.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

Sin embargo, la producción de los paneles solares, así como el tratamiento de los mismos después de su vida útil requiere de un tratamiento muy cuidadoso ya que se emplean ciertos componentes peligrosos para la salud humana. Entre estos elementos se encuentran el ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y fluoruro de hidrógeno (HF). Los paneles que no emplean silicio como base, como los de telururo de cadmio (CdTe) y los de cobre indio selenio (CIS) emplean elementos más tóxicos para la salud humana que los paneles tradicionales [18]. Entre estos elementos destaca el cadmio por su toxicidad ya que, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, tiene efectos tóxicos en los riñones y en los sistemas óseo y respiratorio; además, está clasificado como carcinógeno para los seres humanos. El cadmio puede recorrer grandes distancias desde la fuente de emisión a través del aire. Se acumula rápidamente en muchos organismos, principalmente moluscos y crustáceos [19] [20]. Sin embargo, estos impactos se concentran en las etapas de producción y fin de vida de las centrales de paneles fotovoltaicos, ya que las características de esta tecnología hacen que durante la operación los impactos sean mínimos en términos de emisiones y residuos generados.

#### **5.4. Centrales eólicas**

Los factores principales relacionados con la generación de electricidad mediante aerogeneradores sobre la salud humana son el ruido y el impacto visual. Existe cierta controversia respecto al ruido de los aerogeneradores ya que estudios elaborados por organizaciones gubernamentales de los países Canadá y Australia aseguran que el ruido generado no supone un daño a la salud humana mientras que las poblaciones cercanas a centrales eólicas han declarado que sufren ruidos y vibraciones relacionadas con las mismas. El impacto visual se trata de un parámetro subjetivo no medible de manera objetiva, sin embargo, pueden considerarse como impacto visual los realizados sobre el terreno de la propia construcción del parque eólico en un emplazamiento determinado, ya que este exige la existencia de accesos habilitados para el transporte del material y de suministros. Estos accesos, en el caso de no existir con anterioridad, suponen la alteración del terreno con todo lo que ello conlleva.

## 6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS IMPACTOS FRENTE A LA GENERACIÓN NUCLEOELÉCTRICA

Una vez llevado a cabo el estudio del ACV de la generación nucleoelectrónica, para poder poner en contexto los resultados obtenidos, es interesante realizar una comparativa con el resto de tecnologías de generación de electricidad. La comparación de los resultados permite poner en relieve los puntos fuertes y los críticos de cada una de las tecnologías, ya que cualquier actividad que produzca un bien o servicio lleva asociado algún impacto ambiental y de esta forma es posible contextualizar los resultados obtenidos para la generación nucleoelectrónica.

A la hora de llevar a cabo la comparativa, es necesario prestar especial atención a la comparabilidad de los resultados. Si bien es cierto que cada ACV está sujeto a sus consideraciones y aproximaciones, esta comparativa es necesario hacerla entre estudios que se hayan llevado a cabo empleando el mismo método de cálculo y estableciendo los mismos límites del sistema, de forma que se garantice la comparabilidad. Por otro lado, los resultados deben estar referenciados a la misma unidad de referencia o unidad funcional, que en este caso es 1kWh de energía generada.

Para elaborar este análisis comparativo es necesario partir de información bibliográfica de estudios de ACV de otras tecnologías de generación eléctrica. Los estudios consultados para elaborar esta comparativa han sido los siguientes:

**Tabla 6-1. Estudios consultados para elaborar la comparativa**

1	<i>Environmental Impact Assessment of three coal-based electricity generation scenarios in China</i>	2012	China
2	<i>Life cycle assessment of power generation technologies with CO<sub>2</sub> capture</i>	2012	Noruega
3	<i>Integrated life cycle assessment of electricity supply scenarios confirms global environmental Benefit of low-carbon technologies</i>	2014	Noruega

Todos estos estudios han elaborado los análisis de las tecnologías de generación eléctrica aplicando la normativa ISO 14040 y 14044, empleando el método ReCiPe y expresando los resultados para 1kWh. En cuanto al alcance, todos tienen en cuenta el alcance de la cuna a la puerta, salvo, el estudio 3, que contabiliza también dentro del ACV los medios necesarios para conectarse a la red de transmisión. Se ha considerado que no es una fase muy significativa

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

dentro del ACV completo de modo que se ha aceptado su comparabilidad con los resultados del ACV de generación nucleoelectrónica de fuente propia.

Las tecnologías escogidas para elaborar la comparativa se recogen a continuación, así como las especificaciones de los tipos de centrales evaluados por cada estudio:

- Térmica convencional a carbón → se han considerado tres centrales térmicas a carbón denominadas subcrítica (300 MW), supercrítica (600MW) y ultra-supercrítica (1000 MW), respectivamente. En este caso se ha llevado a cabo una media de los resultados presentados para cada tipología de central.
- Ciclo combinado a gas natural → central térmica de ciclo combinado
- Ciclo combinado a gas natural con CC → central térmica de ciclo combinado con captura de CO<sub>2</sub>
- Hidroeléctrica → se ha considerado un complejo hidroeléctrico con una capacidad total de 2,67GW que incluye cinco embalses y una central de pasada. Se ha realizado una media de los resultados presentados en el estudio.
- Fotovoltaica → se han considerado centrales fotovoltaicas con paneles del tipo CIGS (Cadmio Indio Galio Selenio, por sus siglas en inglés), de silicio policristalino y de cadmio-teluro. En el estudio se ofrecen los resultados para cada tipo de parque fotovoltaico con los distintos tipos de paneles, por lo tanto, se ha tomado el promedio de los resultados ofrecidos para elaborar la comparativa.
- Eólica → las tecnologías consideradas incluyen parques eólicos en tierra y en mar (*onshore* y *offshore*). De los resultados presentados por el estudio se ha tomado el promedio de ambos tipos de tecnología para establecer la comparativa.

A continuación, se adjunta la

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

**Tabla 6-2**, en la cual se recogen todos los resultados para cada categoría de impacto en sus correspondientes unidades por 1 kWh de energía generado. Los puntos de colores de cada categoría ponen en relieve cuál es el más significativo (rojo) y cual menos (verde) dentro de cada una de las categorías.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

Tabla 6-2. Comparativa de ACV de otras fuentes de generación de electricidad

Categorías de impacto	Unidad	LWR CA		SMR CA		HWR CA		LWR CC		SMR CC		Térmica convencional carbón		Ciclo combinado gas natural		Ciclo combinado gas natural con CC		Hidroeléctrica		Fotovoltaica		Eólica	
		propia	3,40E-02	4,01E-02	7,71E-02	4,01E-02	7,71E-02	2,74E-02	2,86E-02	7,60E-01	5,27E-01	2,47E-01	4,22E-02	3,09E-02	1,03E-02	3,40E-02	4,01E-02	7,71E-02	4,01E-02	7,71E-02	4,01E-02	7,71E-02	4,01E-02
Fuente																							
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	2,18E-09	2,59E-09	4,47E-09	2,59E-09	4,47E-09	2,11E-08	1,81E-09	1,67E-09	1,81E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09	1,67E-09
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	4,45E-04	5,41E-04	5,37E-04	5,41E-04	5,37E-04	3,46E-04	3,97E-04	4,23E-03	3,78E-03	4,68E-03	2,39E-04	2,13E-04	6,54E-05	2,39E-04	2,13E-04	2,39E-04	2,13E-04	2,39E-04	2,13E-04	2,39E-04	2,13E-04	2,39E-04
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	9,35E-07	7,43E-07	2,53E-06	7,43E-07	2,53E-06	8,19E-07	4,36E-07	9,85E-05	5,40E-06	1,01E-05	2,06E-06	6,97E-05	7,60E-06	2,06E-06	6,97E-05	2,06E-06	6,97E-05	2,06E-06	6,97E-05	2,06E-06	6,97E-05	2,06E-06
Eutrofización del agua	kg P eq	8,08E-05	1,00E-04	6,29E-05	1,00E-04	6,29E-05	6,02E-05	7,26E-05	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04
Eutrofización marina	kg N eq	8,06E-02	1,00E-01	5,87E-02	1,00E-01	5,87E-02	6,11E-02	7,50E-02	9,72E-02	8,80E-02	1,12E-01	4,32E-03	3,71E-02	1,53E-02	4,32E-03	3,71E-02	4,32E-03	3,71E-02	4,32E-03	3,71E-02	4,32E-03	3,71E-02	4,32E-03
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	6,64E-04	8,19E-04	6,01E-04	8,19E-04	6,01E-04	5,08E-04	6,08E-04	5,90E-03	6,17E-04	7,68E-04	4,16E-04	1,05E-04	6,00E-05	4,16E-04	1,05E-04	4,16E-04	1,05E-04	4,16E-04	1,05E-04	4,16E-04	1,05E-04	4,16E-04
Formación de fotoq. de ozono	kg NMVOC	2,23E-04	2,57E-04	3,84E-04	2,57E-04	3,84E-04	1,71E-04	1,84E-04	1,45E-03	7,57E-04	9,16E-04	1,13E-04	6,44E-05	1,57E-04	1,13E-04	6,44E-05	1,13E-04	6,44E-05	1,13E-04	6,44E-05	1,13E-04	6,44E-05	1,13E-04
Formación de partículas	kg PM10 eq	2,34E-06	1,75E-06	1,35E-05	1,75E-06	1,35E-05	1,80E-06	8,01E-07	6,75E-06	6,31E-03	8,12E-03	1,07E-04	1,40E-03	3,79E-04	1,07E-04	1,40E-03	1,07E-04	1,40E-03	1,07E-04	1,40E-03	1,07E-04	1,40E-03	1,07E-04
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	1,25E-03	1,57E-03	9,28E-04	1,57E-03	9,28E-04	9,49E-04	1,17E-03	2,74E-03	1,17E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03	2,74E-03
Ecotoxicidad del agua	kg 1,4-DB eq	1,26E-03	1,57E-03	9,28E-04	1,57E-03	9,28E-04	9,51E-04	1,17E-03	2,61E-03	1,17E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03	2,61E-03
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	1,26E+00	1,50E+00	1,16E+00	1,50E+00	1,16E+00	6,34E-01	5,62E-01	3,43E-03	5,62E-01	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03	3,43E-03
Radiación	kgq U235 eq	3,94E-03	4,78E-03	3,08E-03	4,78E-03	3,08E-03	3,10E-03	3,66E-03	1,85E-03	4,88E-04	6,75E-04	1,53E-02	9,88E-03	2,86E-04	1,53E-02	9,88E-03	1,53E-02	9,88E-03	1,53E-02	9,88E-03	1,53E-02	9,88E-03	1,53E-02
Ocupación de terreno	m <sup>2</sup>	8,48E-06	1,05E-05	1,91E-05	1,05E-05	1,91E-05	6,54E-06	7,55E-06	4,08E-06	7,55E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06	4,08E-06
Transformación de suelo natural	m <sup>2</sup>	5,00E-02	3,66E-02	2,13E-01	3,66E-02	2,13E-01	5,07E-02	1,85E-02	1,18E-04	1,85E-02	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,18E-04
Disminución de recursos hídricos	m <sup>3</sup>	2,16E-01	2,69E-01	1,52E-01	2,69E-01	1,52E-01	1,63E-01	2,02E-01	1,32E-03	2,56E-04	5,21E-04	2,44E-03	1,09E-02	8,84E-03	2,44E-03	1,09E-02	2,44E-03	1,09E-02	2,44E-03	1,09E-02	2,44E-03	1,09E-02	2,44E-03
Disminución de recursos minerales	kg Fe eq	1,06E-02	1,26E-02	2,40E-02	1,26E-02	2,40E-02	8,43E-03	9,12E-03	1,93E-01	9,12E-03	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01
Disminución de recursos fósiles	kg oil eq	1,06E-02	1,26E-02	2,40E-02	1,26E-02	2,40E-02	8,43E-03	9,12E-03	1,93E-01	9,12E-03	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01	1,93E-01

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

En la

**Tabla 6-2** se recogen los resultados para las categorías de impacto de cada estudio de ACV. Todas aquellas celdas que se representen en blanco indica que el propio informe de donde se ha obtenido la información no muestra los resultados para todas las categorías de impacto, sino que lo hace para las más representativas o las que considera de mayor relevancia representar.

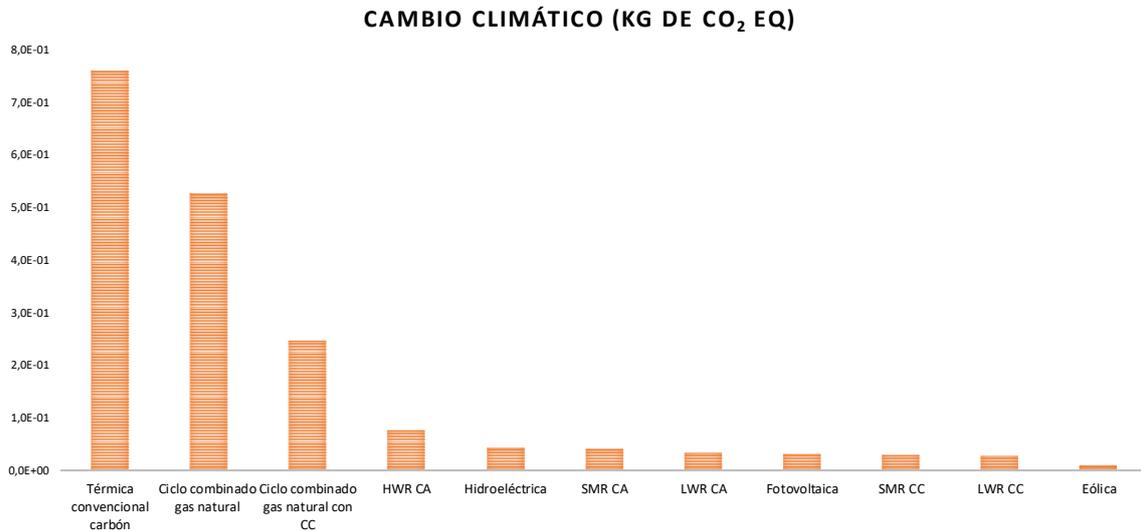
## 6.1. Cambio climático

Los resultados de la comparativa de la categoría de cambio climático se recogen en la Figura 6-1.

Aquellas tecnologías que emplean como combustible alguno de origen fósil presentan contribuciones al cambio climático más elevadas por las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la combustión de dichos recursos fósiles. Dentro de las **centrales térmicas**, la más emisora de gases de efecto invernadero es la térmica convencional a carbón. Teniendo en cuenta que emplea como combustible carbón es lógico que se sitúe por encima de aquellas que emplean como combustible gas natural, ya que debido a la proporción de hidrógeno/carbono de sus moléculas emiten un 40% más de CO<sub>2</sub> que las de gas natural. Las emisiones de óxidos de nitrógeno también contribuyen al cambio climático y de nuevo el carbón, junto al fuel oil, son los combustibles de origen fósil que los generan en mayor proporción. Las dos térmicas que menos emisiones de GEIs causan son casualmente las que emplean como combustible el gas natural, si bien es cierto que emiten menos gases de efecto invernadero en comparación con las de carbón, siguen estando por encima de otras tecnologías por el hecho de producirse combustión de una fuente de origen fósil. La central de ciclo combinado a gas natural con captura de CO<sub>2</sub> consigue reducir casi a la mitad las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tras las tres tecnologías térmicas se encuentran el resto de las tecnologías analizadas con una diferencia significativa en la contribución al cambio climático. Las tecnologías de **generación nucleoelectrónica** presentan una contribución al cambio climático significativamente más pequeña debido a que la fuente para generar la electricidad no es de carácter fósil y no se producen esas emisiones de gases de efecto invernadero de forma directa durante la producción de la electricidad como es el caso de las térmicas. Las contribuciones al cambio climático de las tecnologías nucleoelectrónicas se deben principalmente a emisiones indirectas por consumos de combustible en el transporte, tareas de construcción, desmantelamiento, etc. que son mucho menores que las que se producen durante la operación de una planta térmica.

De la misma forma sucede con las **tecnologías de origen renovable** que son la hidroeléctrica, la fotovoltaica y la eólica que presentan una contribución baja en comparación con las térmicas, ya que se debe a consumos en transporte, construcciones, etc. que son de carácter puntual.



**Figura 6-1. Comparativa de la categoría cambio climático**

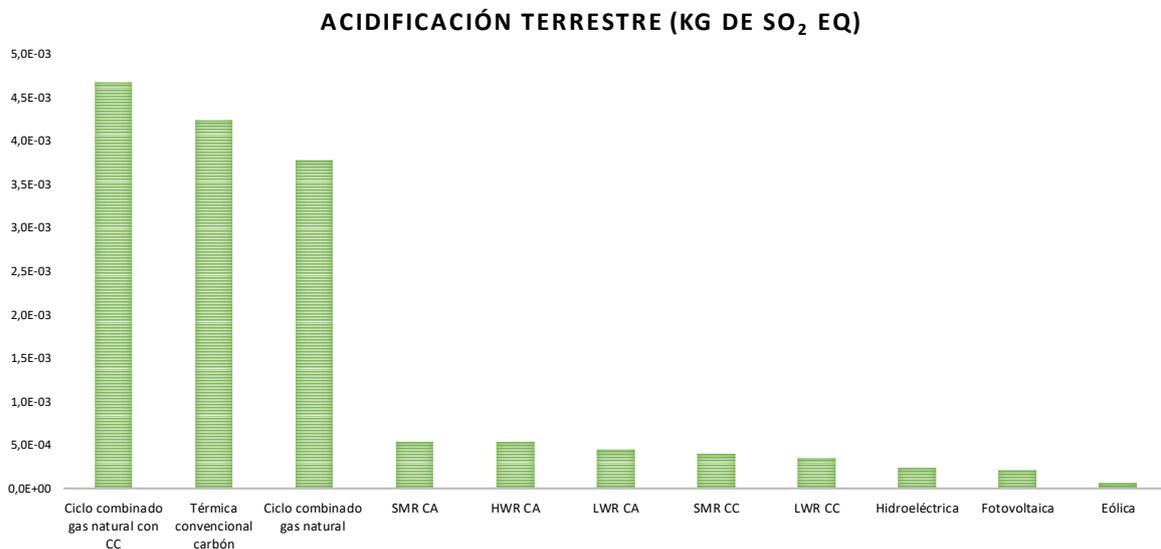
## 6.2. Acidificación terrestre

Las tecnologías que más impacto suponen a esta categoría son las térmicas, concretamente la de ciclo combinado con captura de CO<sub>2</sub> seguida de la convencional a carbón y ciclo combinado a gas natural. Las sustancias capaces de provocar la acidificación de los suelos (SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) son producidas en mayor medida por las centrales térmicas. La captura de CO<sub>2</sub> en las centrales de ciclo combinado de gas natural se trata de una tecnología que favorece las reducciones de gases de efecto invernadero casi a la mitad en comparación con las técnicas tradicionales, sin embargo, conllevan una penalización en la eficiencia energética por lo que amplifica el efecto de las emisiones que se producen durante las fases del ciclo de vida. Esto se ve reflejado en la categoría de impacto de la acidificación terrestre ya que la penalización sobre la eficiencia hace que la tecnología de ciclo combinado con captura de CO<sub>2</sub> sea la más contribuyente. En las centrales de ciclo combinado a gas natural, estas emisiones dependen de la capacidad térmica de la turbina de gas, llegando a ser considerables las emisiones de NO<sub>x</sub> cuando dicha capacidad es elevada [11] por eso presenta también una contribución considerable.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

Las centrales de **generación nucleoelectrónica** contribuyen a esta categoría de impacto en menor medida ya que estas emisiones se producen de forma puntual, durante los procesos de construcción o desmantelamiento, o en menores cantidades en operación asociadas a transportes o consumos auxiliares.

Por último, se encuentran las tres de **fuentes renovables** las cuales no emiten durante la operación estas sustancias susceptibles de provocar la acidificación de los suelos solo en los procesos en los que se produzcan consumos de combustibles fósiles o por el propio consumo de electricidad para la producción de los elementos necesarios.



**Figura 6-2. Comparativa de la categoría de impacto de acidificación terrestre**

### 6.3. Eutrofización del agua

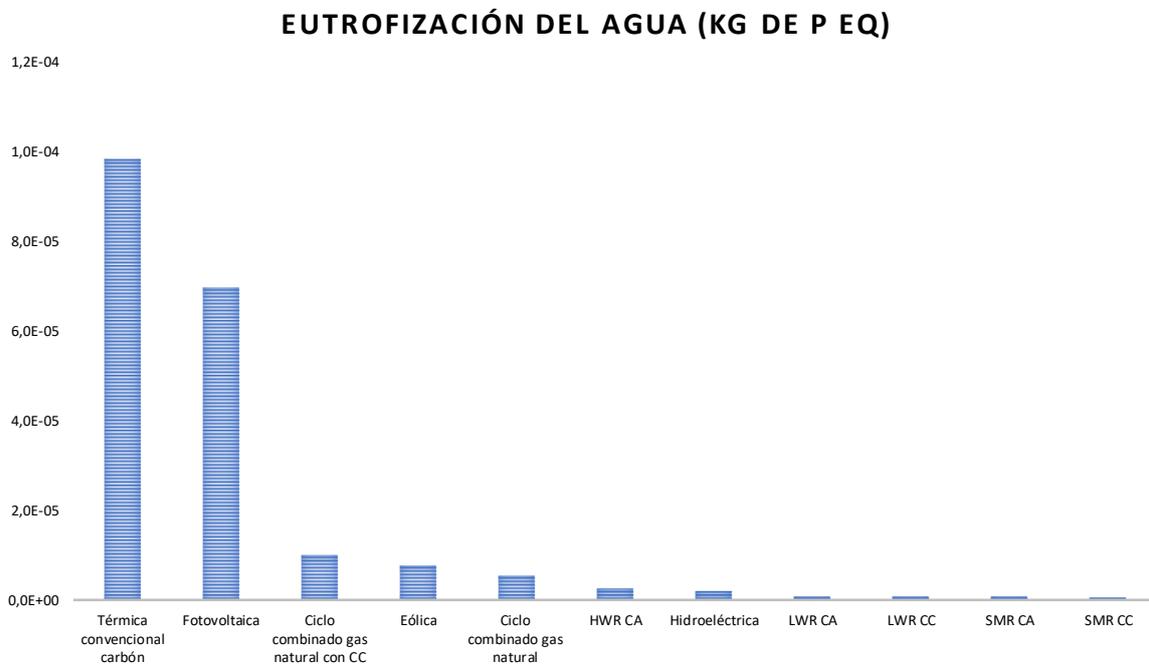
Las principales causas de la eutrofización provienen de diferentes orígenes como el uso de fertilizantes, descarga de residuos y emisión de sustancias por actividades antropogénicas y eventos naturales. Las sustancias basadas en nitrógeno (N), fósforo (P), amoníaco (NH<sub>3</sub>), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) son las que contribuyen en mayor medida a los procesos de eutrofización.

Las centrales térmicas convencionales a carbón son las centrales que suponen un mayor impacto a esta categoría por las emisiones relacionadas con compuestos capaces de provocar la

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

eutrofización del agua. Concretamente, las emisiones de óxidos de nitrógeno pueden acabar en medios hídricos por la propia acción de la lluvia que arrastra las emisiones liberadas al medio por parte de las centrales térmicas a carbón. Sin embargo, con relación al resto de centrales térmicas comparadas la contribución es mucho menor gracias al gas natural que debido a su naturaleza emite óxidos de nitrógeno en menores cantidades (ver apartado 4.1.2).

Destaca la contribución a la eutrofización por parte de la generación fotovoltaica. La extracción de los materiales necesarios para la producción, los residuos generados y la producción de las láminas de cristal para conformar las células fotovoltaicas pueden hacer que se generen sustancias que sean capaces de producir procesos de eutrofización.



**Figura 6-3. Comparativa de la categoría de impacto eutrofización del agua**

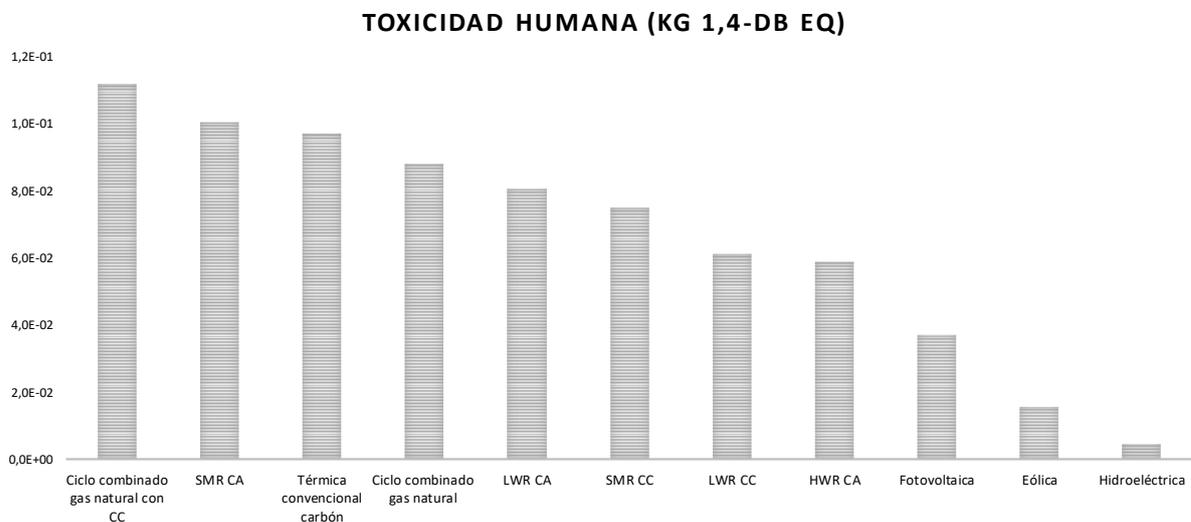
**6.4. Toxicidad humana**

La tecnología de ciclo combinado a gas natural con CC es la que contribuye a la toxicidad humana en mayor medida debido a la penalización en la eficiencia energética por el proceso de captura de CO<sub>2</sub>, lo cual se ve reflejado en diferentes parámetros como la formación de partículas, COV, etc. Entre las cuatro tecnologías más contribuyentes a esta categoría de impacto se

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

encuentra la **nucleoeléctrica** SMR de ciclo abierto seguida de dos **térmicas**, convencional a carbón y ciclo combinado a gas natural. En el caso de la nuclear, esta contribución se encuentra relacionada con el carácter radiactivo de los elementos involucrados en la tecnología, mientras que, en el caso de las térmicas, se relaciona con las emisiones procedentes de la combustión de la fuente de origen fósil, la cual genera COV, SO<sub>2</sub>, NOx, materia particulada, etc. las cuales emitidas al medio afectan a la salud humana.

El resto de tecnologías de generación nucleoeléctrica siguen a las térmicas debido principalmente a la naturaleza radiactiva del combustible empleado y en menor medida por las emisiones correspondientes al uso de combustibles fósiles en los procesos indirectos. Respecto a las tecnologías de origen **renovable** destaca la fotovoltaica. Esta contribución a la toxicidad está relacionada, principalmente, con el uso de elementos con un potencial tóxico elevado para la fabricación de los paneles como es el caso del cadmio, sin embargo, este impacto se concentra en las fases de producción y fin de vida de los paneles. Le sigue la tecnología eólica la cual puede deber su contribución al uso de tierras raras (lantánidos) para la construcción de los propios aerogeneradores que puede suponer un riesgo a la salud humana por el potencial tóxico de las mismas.

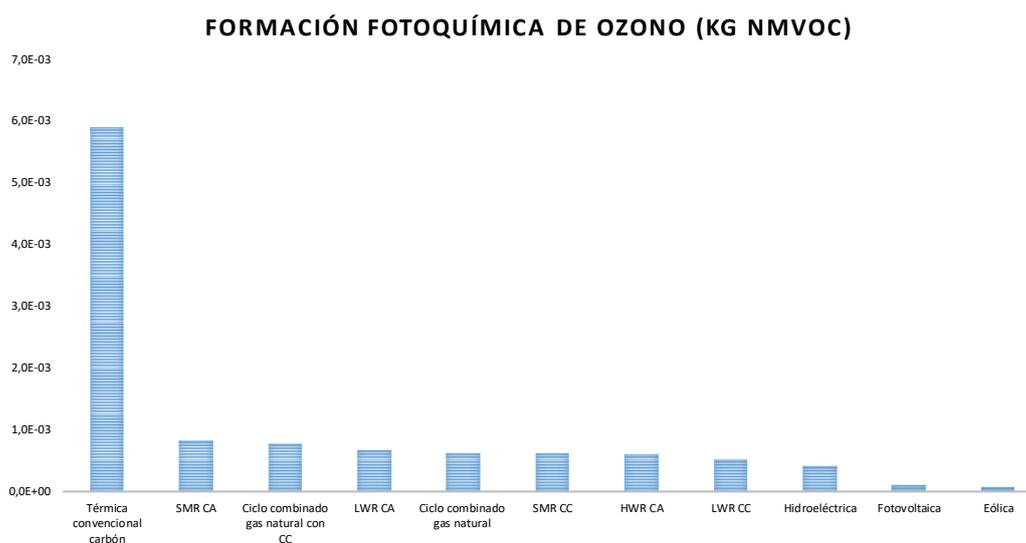


**Figura 6-4. Comparativa de la categoría toxicidad humana**

## 6.5. Formación fotoquímica de ozono

En la Figura 6-5, destaca la contribución a esta categoría por parte de la central **térmica convencional a carbón**. Esta elevada contribución se debe a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NOx) que se producen durante la combustión. Los COV y los NOx son los contaminantes precursores para la formación fotoquímica del ozono. Estos contaminantes están asociados a actividades de combustión de recursos fósiles como el carbón. No sucede lo mismo en las centrales a gas natural ya que las emisiones generadas por este combustible son menores que las que se producen a partir del carbón. Concretamente, las emisiones de NOx generadas por el carbón son dos veces superiores a las del gas natural, lo que contribuye a que las centrales que parten exclusivamente de la combustión del carbón para la obtención de electricidad provocan una elevada contribución a la formación fotoquímica de ozono al emitir los contaminantes primarios para que se produzca.

Como se representa en la Figura 6-5, el resto de tecnologías se encuentran bastante equilibradas en cuanto a la contribución de los impactos, ya que no existen grandes diferencias en las emisiones de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Por otro lado, destacar que la contribución de estas tecnologías a la formación fotoquímica de ozono, salvo por las tecnologías térmicas, no se produce por emisiones directas durante la operación de las plantas, sino que se producen durante las etapas de construcción, desmantelamiento, transporte de materias y suministros, entre otros procesos indirectos.



**Figura 6-5. Comparativa de la categoría de impacto formación fotoquímica de ozono**

## 6.6. Radiación

Como se puede observar en la Figura 6-6, solo se puede comparar esta categoría de impacto con los resultados del ACV de la central térmica convencional a carbón ya que el resto de estudios no los representan por su baja contribución o porque no se considera una categoría significativa en las tecnologías escogidas. En la Figura 6-6 se refleja como en el caso de la tecnología de generación a partir de la combustión de carbón, la radiación supone un impacto casi inapreciable en comparación con las tecnologías de **generación nucleoelectricas**, como cabe esperar. Esta contribución se debe al empleo durante el ciclo de vida de esta tecnología de elementos de carácter radiactivo.

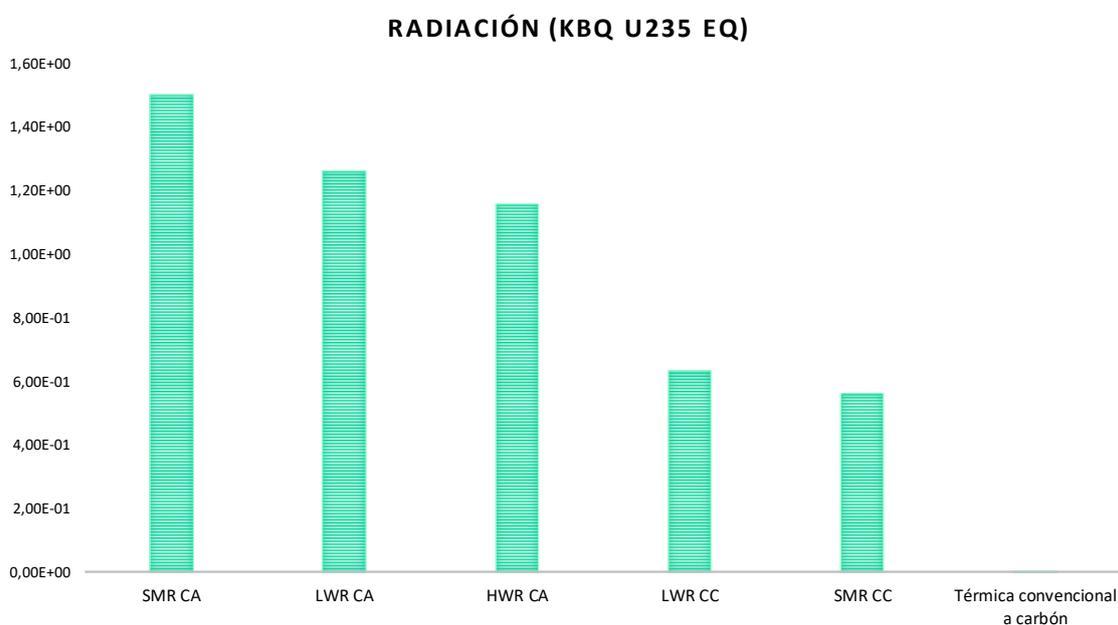


Figura 6-6. Comparativa de la categoría de impacto radiación

Desde el punto de vista radiológico, la contribución a esta categoría por las centrales térmicas de producción de energía eléctrica mediante la combustión de carbón se debe al hecho de que el combustible utilizado en ellas posee concentraciones variables de radionucleidos de origen natural procedentes de las series del uranio-238, uranio-235, torio-232 y potasio-40 que se incrementan en el proceso industrial. Los radionucleidos, que forman parte de las sustancias minerales no combustibles del carbón, se concentran y reparten entre las escorias y las cenizas volantes, con la excepción de los gaseosos y los materiales volatilizados que se incorporan directamente a los gases de combustión [21].

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

A pesar de no disponer de los resultados correspondientes a esta categoría de impacto para el resto de tecnologías estudiadas, se puede predecir que no se consideraría un parámetro crítico en ninguna de ellas, ya que no intervienen elementos radiactivos para la obtención de electricidad.

## **6.7. Ocupación del terreno**

La ocupación del terreno mide el área ocupada por cada tecnología durante un tiempo determinado. En los ACV de tecnologías de generación eléctrica, la ocupación del terreno y la producción energética depende de la tecnología y su eficiencia (área/kWh producido).

Como se puede observar en la Figura 6-7, las tecnologías que requieren de mayores ocupaciones del terreno son las centrales hidroeléctricas. Se trata de un parámetro crítico y aunque depende del tipo de central hidroeléctrica, de manera genérica las necesidades de ocupación son muy elevadas. Como característica general se puede determinar que la eficiencia por metro cuadrado ocupado no es tan elevada como en el caso de otras centrales (nucleoeléctricas, ciclo combinado, térmicas convencionales).

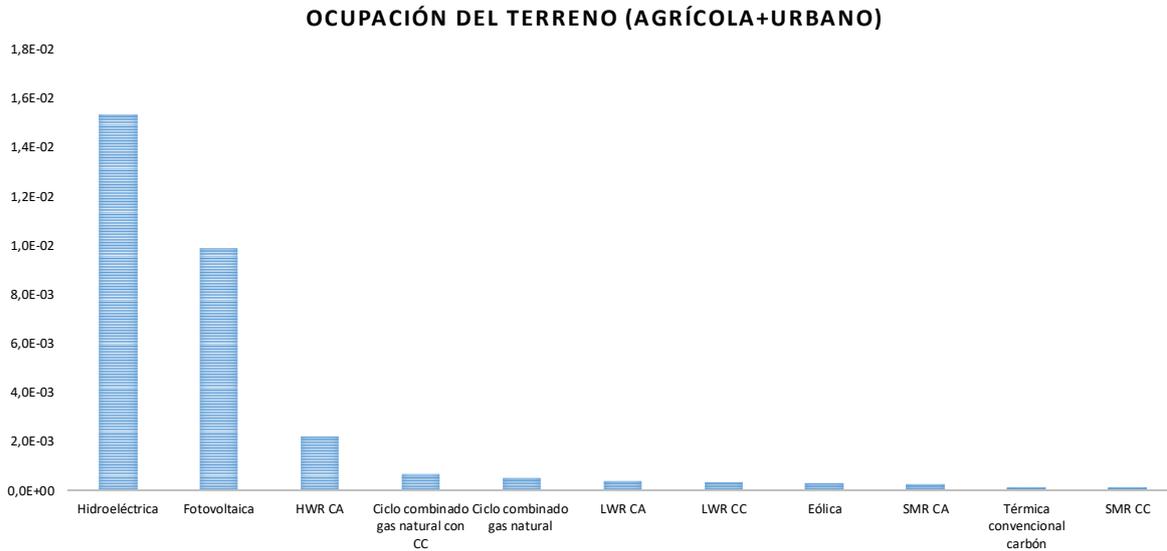
Del mismo modo sucede con las centrales fotovoltaicas, que requieren de grandes extensiones de suelo para la instalación de las placas solares por lo que la ocupación del terreno también es un punto crítico en este tipo de tecnologías. Sin embargo, en el caso de las centrales eólicas, si bien es cierto que requieren de una gran extensión para el emplazamiento de la central, esta no está reñida con otras actividades simultáneas. Es más, es posible combinar parques eólicos con actividades agropecuarias como pastoreo y cultivos. Por este motivo la ocupación del terreno es un factor a considerar en las centrales eólicas, pero no supone un impacto tan elevado como sucede en el caso de las centrales fotovoltaicas e hidroeléctricas ya que no impide mantener cierta actividad en la zona donde se encuentre el parque eólico.

Respecto a las necesidades de ocupación del terreno de las centrales de generación nucleoelectrica, destaca las del tipo HWR la cual presenta el elemento diferenciador con el resto de la necesidad de agua deuterada en el proceso. Esta agua deuterada requiere de una planta que la produzca lo cual hace que las necesidades de ocupación del terreno sean mayores para este tipo de tecnología en comparación con el resto de tecnologías de generación nucleoelectrica.

Por último, las centrales térmicas convencionales a carbón presentan una eficiencia por metro cuadrado muy elevada por lo tanto la contribución a esta categoría de impacto es la menor con

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

respecto al resto. Se puede observar que entre las de ciclo combinado la mayor contribución por la ocupación del suelo se debe a la que ofrece captura de CO<sub>2</sub> ya que, como se comentaba anteriormente, la eficiencia disminuye.



**Figura 6-7. Comparativa de la categoría de impacto ocupación del terreno (m<sup>2</sup>\*a)**

**6.8. Disminución de recursos minerales**

Como se detalla en la Figura 6-8, las tecnologías que más contribuyen a esta categoría de impacto son las de generación **nucleoeléctrica** debido, básicamente, al consumo del mineral de uranio para la obtención del combustible.

Después de las tecnologías de generación nucleoeléctrica, se encuentra la **fotovoltaica** la cual debe los impactos de esta categoría al uso de minerales como el silicio, cadmio, indio, etc. para la manufactura de los paneles fotovoltaicos. La construcción de los aerogeneradores para los parques eólicos también requiere de la extracción de recursos minerales, concretamente de las llamadas tierras raras, lo cual constituye cierto impacto a esta categoría. Si bien es cierto que tanto los paneles fotovoltaicos como los aerogeneradores requieren de recursos minerales no renovables para su construcción se trata de un consumo puntual, es decir, que solo se requieren si se producen recambios por mantenimiento, de forma que no se trata de un gran impacto.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

Por último, las centrales **térmicas**, tanto la convencional como las de ciclo combinado, no presentan un consumo de minerales significativo ya que los consumos minerales que se producen son de carácter puntual por necesidades constructivas o suministros de materiales de recambios. La térmica convencional a carbón no tiene un consumo de minerales tan alto como la nucleoelectrónica ya que su fuente de generación energética depende de un recurso fósil, no de un mineral. Las categorías de disminución recursos fósiles y recursos minerales se contabilizan por separado ya que el método ReCiPe diferencia los minerales presentes en la corteza terrestre frente al petróleo, carbón, antracita y demás recursos fósiles.



**Figura 6-8. Comparativa de la categoría de disminución de recursos minerales**

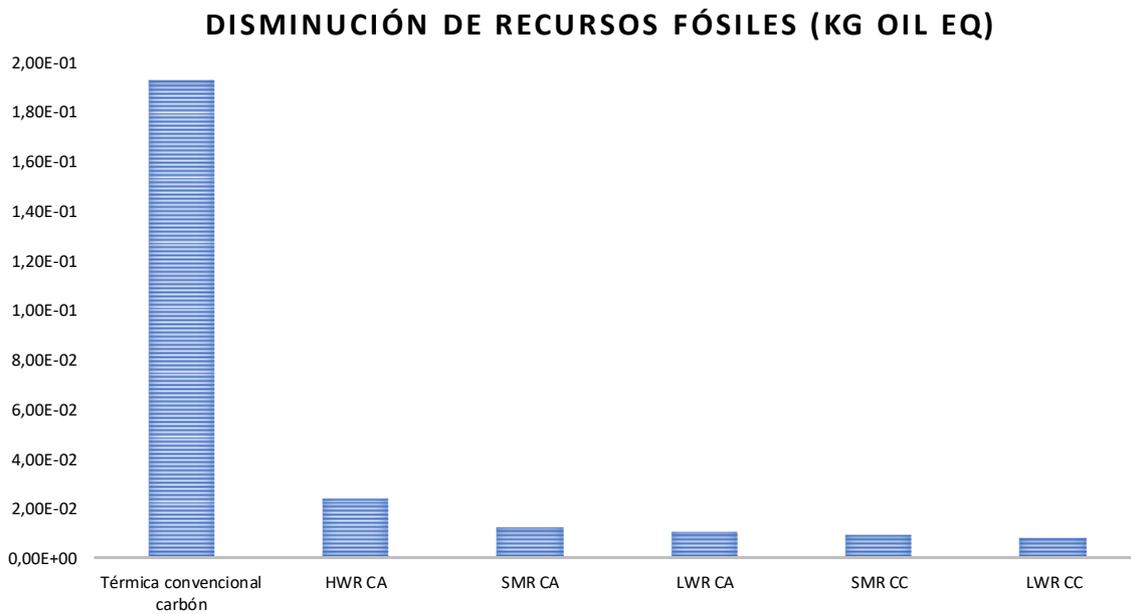
## 6.9. Disminución de recursos fósiles

En la Figura 6-9 se comparan las tecnologías de generación nucleoelectrónica con la térmica convencional a carbón ya que el resto de estudios no reportan el dato de la contribución a esta categoría.

La contribución a esta categoría es significativamente más alta para la tecnología que emplea carbón como único elemento combustible, es decir la **térmica convencional a carbón**, ya que se trata de un recurso fósil no renovable. Debido a la creciente demanda energética por el desarrollo de la sociedad, el carbón se ve gravemente degradado suponiendo esto un punto crítico en las centrales que dependen del mismo.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

La contribución que se observa en la figura por parte de las tecnologías de generación **nucleoeléctrica** se debe principalmente a los consumos indirectos de combustibles de origen fósil para las labores de transporte, construcciones, etc.



**Figura 6-9. Comparativa de la categoría de disminución de recursos fósiles**

## **7. RESUMEN DEL ESTUDIO PARA LA IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE POSIBLES EFECTOS SOBRE LA SALUD HUMANA E IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DE POTENCIA EN CHILE**

### **7.1. Impactos ambientales de la generación nuclear de potencia**

#### **7.1.1. Descripción de la generación de energía eléctrica con origen nuclear**

a) Fases de la vida de una central nuclear

- **Construcción.** Esta fase consiste en un conjunto de tareas que engloban la selección del emplazamiento, la planificación, el desarrollo de la obra civil, construcción y montaje de equipos y sistemas, instalación eléctrica y controlas de calidad de la instalación.
- **Operación.** Esta etapa se resume en la quema del combustible nuclear para la obtención de energía eléctrica a través de reacciones de fisión en el núcleo del reactor nuclear. En esta fase tiene lugar la recarga del combustible en cada ciclo de operación y el almacenamiento en piscinas del combustible irradiado.
- **Desmantelamiento.** Clausura de la central nuclear incluyendo todas aquellas tareas de descontaminación y gestión de residuos radiactivos generados.

b) Tecnologías de generación nucleoelectrónica

- **Reactores de Agua Ligera o Light Water Reactor (LWR).** Este tipo de reactores constituyen la tecnología de generación nucleoelectrónica dominante en todo el mundo. La característica básica de un LWR consiste en el empleo de agua ligera como refrigerante y moderador. Dentro de este tipo de reactores, se distinguen, a su vez, dos diseños diferentes: los Reactores de Agua a Presión o Pressurizer Water Reactor (PWR) y los Reactores de Agua en Ebullición o Boiling Water Reactor (BWR), siendo los PWR los más comunes. La característica básica de los PWR es que el agua, que actúa como refrigerante, permanece líquida a su paso por el reactor gracias a un componente fundamental: el presionador. Los reactores PWR más comunes son capaces de alcanzar una potencia unitaria de 3000 MW térmicos.

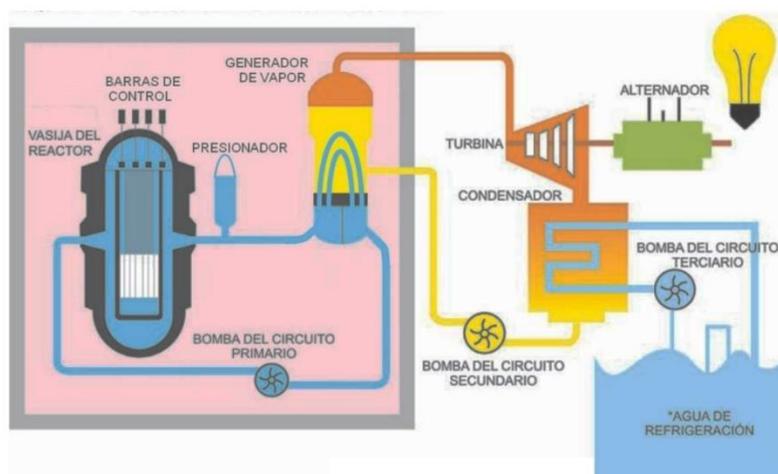


Figura 7-1. Esquema básico de un reactor tipo PWR (LWR).

- Reactores Modulares o Small Modular Reactor (SMR). Este tipo de reactores avanzados son capaces de producir hasta 300 MWe de potencia. Sus características principales son su reducido tamaño y la versatilidad que ofrecen en la fase de construcción. La planta se divide en varios módulos que se construyen de forma separada y se transportan a los emplazamientos en cuestión donde surge la demanda. Una vez allí, tiene lugar la integración de cada módulo y la instalación completa de la planta. Hoy en día, ningún país del mundo cuenta con un reactor SMR en operación. Aun así, existen alrededor de 50 diseños de SMR en todo el mundo dentro de los cuales se distinguen diferentes tecnologías que se diferencian en aspectos de diseño como el moderador, el refrigerante, las energías de los neutrones que inducen la fisión, el combustible, etc. Para el presente estudio se ha tomado como referencia escalada los reactores SMR que adoptan el diseño de los reactores LWR.

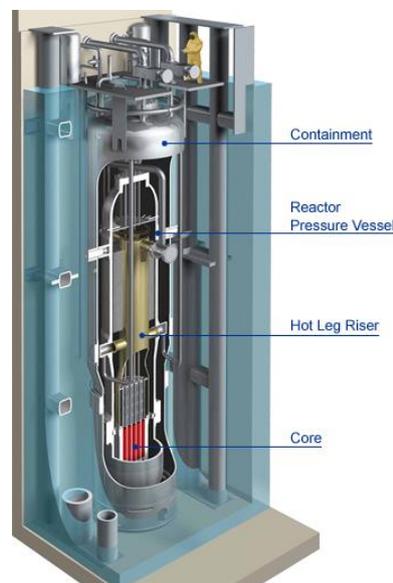


Figura 7-2. Esquema básico de un reactor tipo SMR.

- Reactores de Agua Pesada o Heavy Water Reactor (HWR) Los Reactores de Agua Pesada o Heavy Water Reactor (HWR) son un tipo de reactores nucleares diseñados para utilizar uranio natural como combustible y agua pesada como moderador de neutrones. Los Reactores de Agua Pesada más

globalmente extendidos son los Reactores de Agua Pesada a Presión canadienses (CANDU) y los HWR indios. Estos reactores disponen de unos generadores de vapor en los cuales se produce la transferencia de calor, al igual que en los PWR. Sin embargo, en los HWR el reactor está contenido en una gran calandria o tanque de agua pesada fabricado en acero inoxidable austenítico. Este tanque se ve atravesado por los canales donde se aloja el combustible. Estos canales van refrigerados también por agua pesada, aunque en este caso no se mezcla con la que constituye la masa de moderador. Este reactor emplea varios cientos de tubos de presión en lugar de una vasija de presión única. En este tipo de reactores se produce la recarga del combustible de modo continuo (online). La pastilla de combustible y los elementos combustibles son similares a los de los reactores tipo PWR.

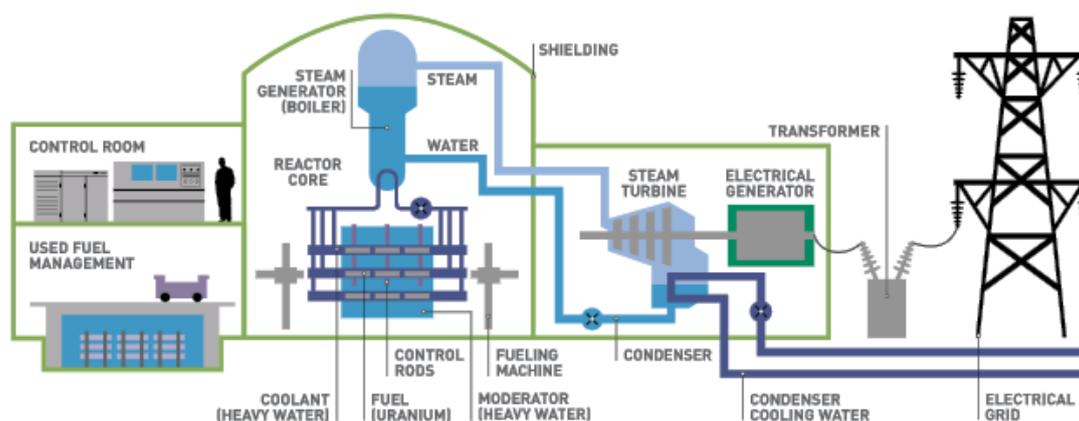


Figura 7-3. Esquema básico de un reactor tipo HWR.

c) Ciclo de Combustible

- Minería y fabricación de concentrados. Fase de extracción del mineral y producción de concentrados de uranio.
- Conversión. Proceso de purificación del óxido  $U_3O_8$  presente en el concentrado y transformación en compuesto gaseoso ( $UF_6$ ) necesario para la separación isotópica.
- Enriquecimiento. Proceso por el cual aumenta la concentración isotópica del isótopo fértil del uranio ( $U-235$ ) alcanzando un valor en torno al 3-4%.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- Fabricación del combustible. Etapa en la que se tiene lugar la conversión química de UF<sub>6</sub> enriquecido en polvo de óxido UO<sub>2</sub>, la fabricación de las pastillas de combustible y la producción y ensamblado de las barras de combustible. Operación. Etapa que comprende las fases de quemado del combustible, recarga y almacenamiento en piscinas.
- Almacenamiento del combustible nuclear: Ciclo Abierto. En esta etapa el combustible nuclear irradiado se considera como residuo y se gestiona almacenándolo de manera definitiva.
- Reprocesado del combustible nuclear: Ciclo Cerrado. En esta fase se recupera el material fisible presente en el combustible gastado para volver a utilizarlo en la fase de operación.

### **7.1.2. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida**

Una vez descritas las tecnologías nucleares y el ciclo del combustible, la caracterización de las emisiones y descargas pasa por llevar a cabo el consiguiente estudio del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Todas las entradas y salidas identificadas en las etapas del ciclo del combustible y en la vida de la planta se van a transformar en impactos al medio mediante la metodología de ACV, contemplando las tres tecnologías.

El ACV surge de la creciente preocupación por la protección ambiental ha propiciado el desarrollo de metodologías que permiten cuantificar el daño provocado por la obtención de productos o servicios. En línea con la intención de llevar a cabo un estudio lo más completo posible, la metodología de ACV evalúa diferentes categorías de impacto ambiental de modo que se puede obtener información del comportamiento ambiental del servicio o producto analizados a diferentes niveles de daño al medioambiente.

Una de las ventajas principales del ACV es que permite identificar los procesos clave que generan la mayor parte de los impactos dentro del ciclo; además de poder tener una imagen mucho más completa del producto o servicio analizado.

Para normalizar los estudios de ACV y poder establecer comparativas surgió la necesidad de crear normas estandarizadas y reconocidas. De aquí surge la familia ISO 14040 que define cuáles son los pasos necesarios para llevar a cabo un estudio de ACV.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

En el presente ACV se ha tenido en cuenta la aproximación de la cuna a la puerta y se ha empleado el software SimaPro® junto con la base de datos Ecoinvent® y la metodología de cálculo ReCiPe®. Además, durante todo el estudio se utiliza la unidad funcional de 1 kWh, de forma que todos los resultados aquí presentados se encuentran todos referenciados a esa unidad funcional.

El ACV permitirá evaluar una serie de categorías de impacto para cada una de las tecnologías seleccionadas en el estudio. Las categorías de impacto son una serie de niveles que traducen las emisiones y consumos del medio en los principales impactos ambientales como son el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono, entre otras. Por otro lado, las categorías de daño reagrupan estas categorías de impacto en tres grandes grupos que reflejan el daño a la salud humana, a los ecosistemas y a la disminución de recursos. A continuación, se muestra la lista de categorías de impacto agrupadas según la categoría de daño correspondiente:

**Tabla 7-1. Categorías de impacto agrupadas según las categorías de daño.**

	Categoría de daño		
	Ecosistemas	Salud humana	Recursos
Categorías de impacto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecotoxicidad marina</li> <li>• Ecotoxicidad del agua</li> <li>• Transformación de suelo natural</li> <li>• Acidificación terrestre</li> <li>• Ocupación de terreno urbano</li> <li>• Eutrofización marina</li> <li>• Cambio climático</li> <li>• Eutrofización del agua</li> <li>• Ecotoxicidad terrestre</li> <li>• Ocupación de terreno agrícola</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiación</li> <li>• Toxicidad humana</li> <li>• Formación de partículas</li> <li>• Formación de fotoquímica de ozono</li> <li>• Cambio climático</li> <li>• Destrucción de la capa de ozono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de recursos minerales</li> <li>• Disminución de recursos fósiles</li> </ul>

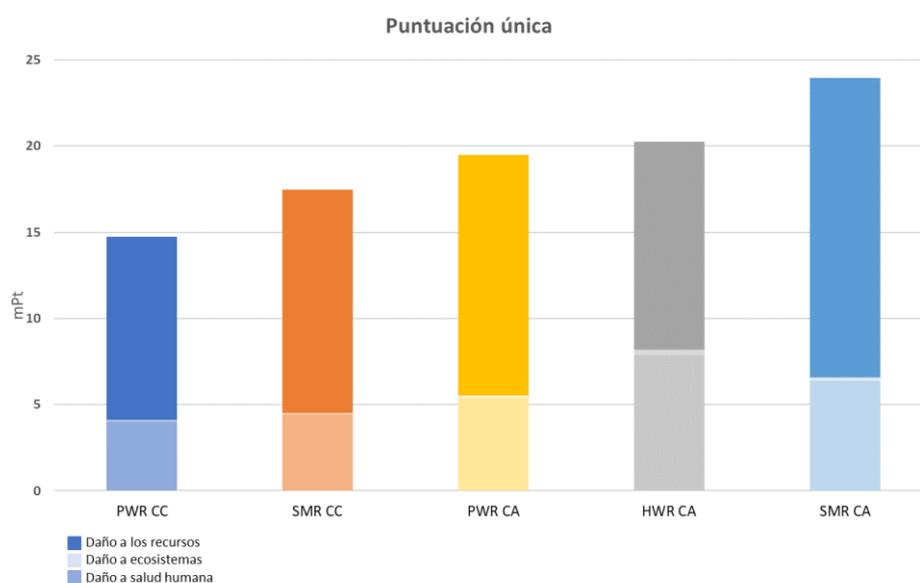
También se ha tenido en cuenta la categoría de impacto de la disminución de recursos hídricos. Sin embargo, el método ReCiPe no ofrece valores de normalización para poder comparar dicha categoría con el resto.

Para poder identificar las principales emisiones y descargas de la producción de energía mediante tecnologías de generación nuclear se ha recopilado el inventario con la ayuda de la base de datos Ecoinvent® además de datos proporcionados por otras fuentes bibliográficas.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

Los resultados obtenidos tras llevar a cabo el ACV permiten llegar a conclusiones sobre los impactos ambientales generados por las tecnologías de generación nuclear. Estas conclusiones son de diversa índole: por un lado, se puede estudiar de forma concreta los resultados del ACV para el caso de la generación nucleoelectrónica atendiendo a las distintas etapas y tecnologías estudiadas; por otro lado, se puede llegar a conclusiones más generales que aplican a la energía nuclear desde una perspectiva global. Los resultados del ACV revelan las siguientes conclusiones:

- Como se describe en la Figura 7-4. Puntuación única para las tecnologías evaluadas, la tecnología que más incide sobre el medio es SMR ciclo abierto, por encima de PWR lo cual concuerda con que PWR ofrece mayores eficiencias respecto a SMR. Esto se debe a que la cantidad de combustible de uranio de partida para la obtención de 1kWh de energía final es mayor para la tecnología SMR por encima de PWR y HWR [22]. No obstante, este análisis se restringe al ámbito medioambiental por lo que no representa las ventajas típicas que ofrecen los reactores SMR en cuanto a seguridad, funcionalidad de la construcción, rentabilidad etc. A las tecnologías de PWR y SMR en ciclo abierto les sigue HWR, que supone menores impactos debido a que el procesado del uranio requiere de menos etapas ya que no se dan procesos de enriquecimiento. Sin embargo, se encuentra por encima de las de ciclo cerrado debido al agua pesada, etapa demandante de energía y recursos.



**Figura 7-4. Puntuación única para las tecnologías evaluadas**

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- En todas las tecnologías evaluadas, se sigue la misma tendencia: la categoría de daño que se ve más afectada es el daño a los recursos. Esto puede verse justificado por el consumo de recursos no renovables (extracción de uranio mineral) que exige este tipo de tecnología.

En la

- **Figura 7-5** se puede observar que las tres tecnologías evaluadas, tanto en ciclo cerrado como en abierto, presentan una distribución de los impactos similar. HWR, sin embargo, muestra una distribución distinta en transformación de suelo natural, formación de partículas y cambio climático mostrando mayores valores que el resto. Esto se debe a la necesidad de la producción de agua pesada, concretamente, al proceso de construcción de la planta de producción y a la energía necesaria para su obtención. La categoría de transformación de suelo natural se ve afectada por la construcción de la planta y las categorías de formación de partículas y cambio climático se deben a la demanda energética necesaria.
- Las dos tecnologías más ventajosas en términos ambientales, según el estudio llevado a cabo, son las de SMR y PWR ciclo cerrado, lo cual resulta coherente debido a el aprovechamiento del residuo como combustible, eliminando así del ciclo de vida cierta proporción de residuos y requiriendo menos cantidad de uranio primario o “virgen” para la misma producción energética.
- En cuanto al proceso que más contribuye en cada uno de los análisis de ciclo de vida es, en todos los casos, la minería y la fabricación de concentrados. Se puede considerar como punto crítico en todos los ACV debido a la explotación de un recurso mineral no renovable, del consumo energético que requiere todo el proceso y de la contaminación de aguas como consecuencia de las actividades en los emplazamientos mineros [23].
- Finalmente, en cuanto a la conclusión general del estudio y, por consiguiente, de la generación de electricidad con origen nuclear, es interesante contrastar los resultados con los principales puntos críticos medioambientales asociados a la producción de electricidad. Todo ello, con la vista en el estudio comparativo de las distintas alternativas energéticas y la posible incorporación de la energía nuclear en el marco energético de Chile.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

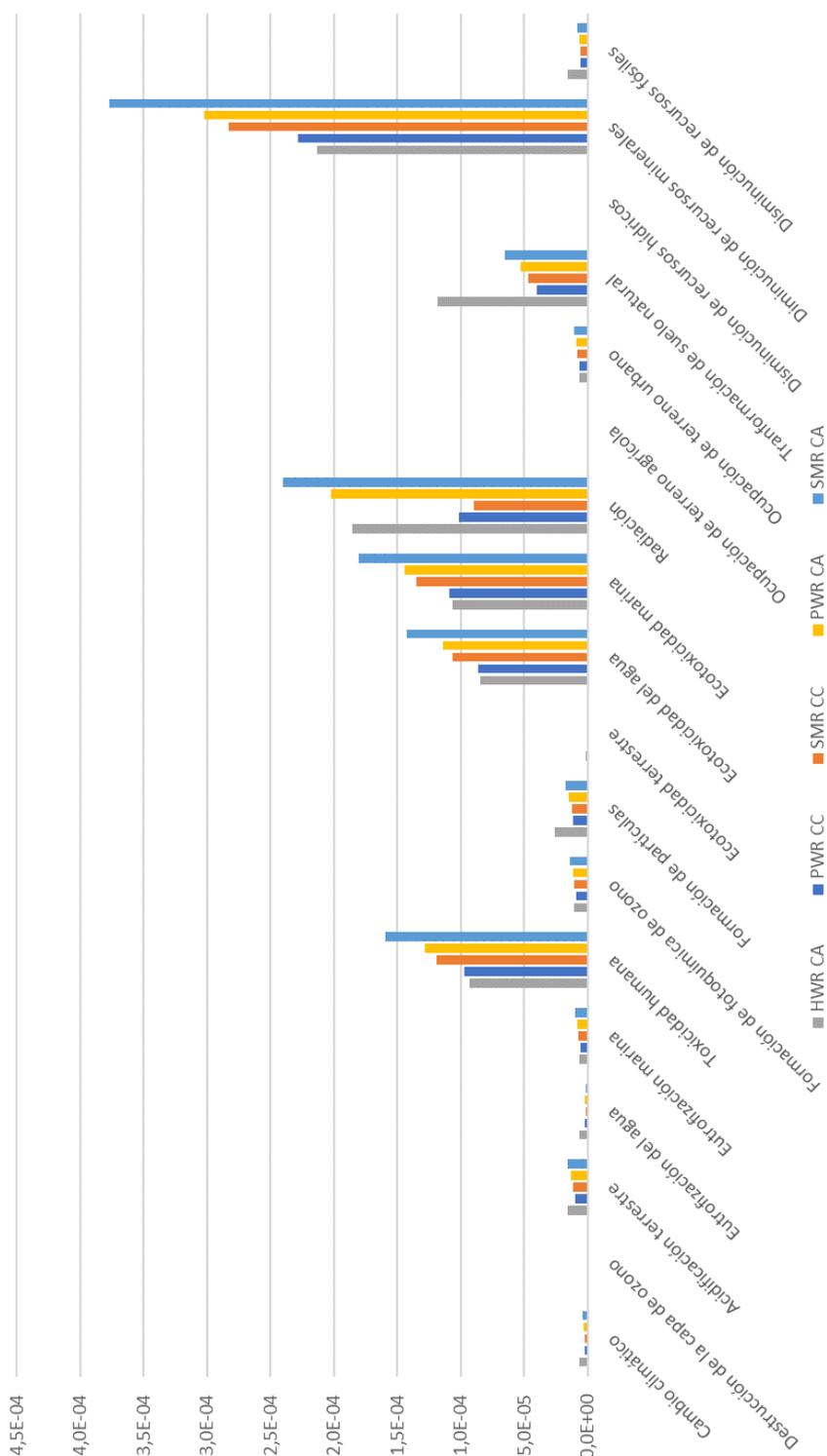


Figura 7-5. Resultados normalizados de las categorías de impacto para cada tipo de tecnología. CA= Ciclo abierto / CC= Ciclo Cerrado

## 7.2. Efectos de la generación nuclear de potencia en Chile y medidas técnicas y administrativas aplicables

### 7.2.1. Variables ambientales del territorio chileno

Para determinar el impacto medioambiental sobre el entorno o las personas derivado de una actividad industrial previamente es conveniente conocer y caracterizar el medio al que afectará dicha actividad. En particular, para una central de generación eléctrica es necesario tener un conocimiento detallado de cuáles son las condiciones medioambientales iniciales antes de la explotación. Es por esto por lo que se describen en este apartado las diferentes variables ambientales del medio susceptibles de verse afectadas por la construcción de la planta. Dado que el caso de estudio no se restringe a un emplazamiento concreto dentro del territorio chileno, se desarrolla un análisis general de las variables ambientales. Sin embargo, las características del territorio hacen de él un país enormemente rico en biodiversidad, clima, demografía y demás variables por lo que la descripción de ellas puede diversificarse enormemente. De cara a simplificar esta descripción ambiental, se puede realizar una aproximación de zonas en las cuales las probabilidades de la instalación de centrales nucleares de potencia pudieran ser más altas atendiendo a diferentes parámetros demográficos, ambientales y estratégicos.

Tabla 7-2. Regiones propuestas para la descripción de las variables ambientales

	Macrozona	Región
1	Norte	Región de Antofagasta
2	Norte	Región de Coquimbo
3	Centro	Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

a. *Clima*

Tabla 7-3. Clasificación climática por macrozonas

Macrozona	Clasificación climática	Características	Temperatura
<i>Norte</i>	Desértico con nublados abundantes	Nubosidad baja/precipitaciones escasas y en invierno	Tª media 13-22°C
<i>Norte</i>	Desértico normal	Aridez/cielos despejados	Oscilación térmica hasta 25°C

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

Macrozona	Clasificación climática	Características	Temperatura
<i>Norte</i>	Desértico marginal bajo	Humedad hacia los valles	Oscilación térmica 7-8°C
<i>Norte</i>	Desértico marginal de altura	Precipitaciones durante veranos	Tª media 15°C
<i>Norte</i>	Estepa de altura	Precipitaciones de nieve disminuyen de norte a sur	Oscilación térmica amplia
<i>Centro</i>	Estepa con nubosidad abundante	Nubosidad baja/alta humedad relativa	Oscilación térmica baja
<i>Centro</i>	Estepa con gran sequedad atmosférica	Cielos despejados/baja humedad relativa/precip. invierno	Oscilación térmica 18-20°C
<i>Centro</i>	Templado con estación seca prolongada de 8-7 meses y gran nubosidad	Nubosidad menos persistente/precipitaciones de mayo a agosto	
<i>Centro</i>	Templado cálido con estación seca prolongada de 8-7 meses	Precipitaciones en invierno/humedad relativa baja	Oscilaciones térmicas 13°C
<i>Centro</i>	Templado cálido con estación seca corta de menos de 4 meses	Precipitaciones más abundantes en el litoral	Oscilación térmica en el interior 9°C
<i>Sur</i>	Templado lluvioso con influencia mediterránea	Precipitaciones continuas/año	Tª media 9-12°C
<i>Sur</i>	Templado frío de costa occidental con máximo invernal de lluvias	Precipitaciones continuas/año	Tª media 7-11°C
<i>Sur</i>	Continental transandino con degeneración estepárica	Disminución de precipitaciones al oeste	
<i>Sur</i>	Estepa fría	Precipitaciones invernales de nieve	Oscilación térmica anual 8-9°C
<i>Sur</i>	Tundra	Precipitaciones más abundantes en verano	Tª media 5-7°C
<i>Austral</i>	Frío polar	Precipitaciones de lluvia y nieve/nubosidad abundante	Tª media -6-2°C

Las regiones priorizadas presentan la siguiente clasificación climática:

- Coquimbo → Estepa con nubosidad abundante
- Libertador General Bernardo O'Higgins → Templado cálido con estación seca corta de menos de 4 meses
- Antofagasta → Desértico con nublados abundantes

*b. Geología y sismología*

Chile presenta 4.200 km de largo con un ancho máximo de 375 km y uno mínimo de unos 90 km, el cual conforma una estrecha lengua de tierra custodiada en todo su largo por dos grandes cordilleras: de los Andes y de la Costa, entre las cuales se encuentra la Depresión Intermedia. Al este, se encuentra la Cordillera de los Andes la cual presenta cumbres que alcanzan los 7.000 m. Esta cordillera forma el límite natural con Argentina y Bolivia. Al oeste, las alturas de la Cordillera de la Costa son menores – un máximo de 3.000 metros en el norte- y van disminuyendo a medida que se avanza al sur. En las zonas del Norte Chico y Central existen los llamados Valles Transversales, que van desde la Cordillera de los Andes hasta el mar [5].

Respecto a la sismología, Chile está ubicado sobre la placa Sudamericana, concretamente se encuentra en el borde occidental de dicha placa lugar donde convergen y se generan zonas de subducción de entre las placas de Nazca y Antártica [6]. Debido a esto, la geología de esta zona se caracteriza por esfuerzos tectónicos que inducen la generación de fallas. Estas interacciones son las responsables de los terremotos generados en todo Chile. Debido a la alta velocidad de convergencia entre Nazca y Sudamérica, la sismicidad de la zona en la que convergen es la más intensa y produce los mayores terremotos en el país. La placa oceánica de Nazca es más densa que la continental de Sudamérica, por lo tanto, penetra bajo la de Sudamérica generando así una zona de subducción. Esto genera, como consecuencia, una fosa (trench) en el fondo del océano. En este punto se generan fuerzas de roce entre ambas placas que retienen el movimiento, solo cuando la fuerza de movimiento es mayor que la que se produce por el rozamiento entre ellas es cuando se producen los terremotos. Si durante un terremoto, el fondo oceánico se desplaza verticalmente, se generan los denominados “tsunamis”. Los sismos ocurren fuera de la costa continental, debido a la deformación en la placa de Nazca al tratar de introducirse bajo el continente. Por regla general en dichos terremotos se tienen magnitudes menores que 8.0. Los **sismos Intraplaca-oceánica** son los sismos que ocurren dentro de la placa oceánica subductada debido al peso de la placa y fuerte acoplamiento interplaca. Los **sismos Intraplaca-continental** son sismos que ocurren dentro de la placa continental debido a deformación generada principalmente por la convergencia entre las placas y por esfuerzos locales. En general, estos sismos ocurren en torno a la cordillera, tanto en Chile como en Argentina.

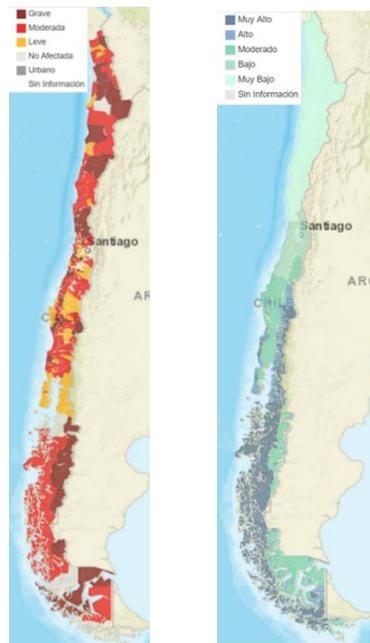
Las zonas más probables de generar futuros terremotos son aquellas en las cuales ha transcurrido suficiente tiempo para acumular esfuerzos desde el último gran terremoto, constituyéndose en las llamadas “gaps” o “lagunas” sísmicas. Esto ha significado que, en general, la infraestructura y obras civiles en Chile respondan satisfactoriamente en caso de terremotos, maximizando la seguridad y minimizando los costos.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

c. Suelo

El análisis del suelo requiere de diferentes perspectivas para evaluar el desempeño ambiental del mismo. Las perspectivas deben abarcar desde el propio uso del suelo y sus cambios a lo largo de los años como la calidad del mismo, la cual está estrechamente relacionada con la contaminación. En Chile, el cambio de uso del suelo está relacionado con problemas de degradación, principalmente asociados a procesos **erosivos** y de **desertificación** [24]. Sin embargo, la degradación del suelo también está relacionada con la **contaminación** del mismo ya que hace que pierda sus facultades.

- a. **Desertificación de los suelos:** El riesgo que presenta el territorio a la desertificación es en mayor medida de carácter moderado lo que implica, a su vez, un mayor número de habitantes afectados por este fenómeno.
- b. **Erosión de los suelos:** La primera causa de degradación en el territorio chileno es la erosión. Esta puede producirse por fenómenos naturales, así como por la acción del ser humano, que como consecuencia de las acciones llevadas a cabo se favorezca la incidencia de los fenómenos naturales erosivos. Es importante destacar que la erosión producida en Chile a lo largo de los años está también estrechamente relacionada con la fragilidad de los ecosistemas que presenta.

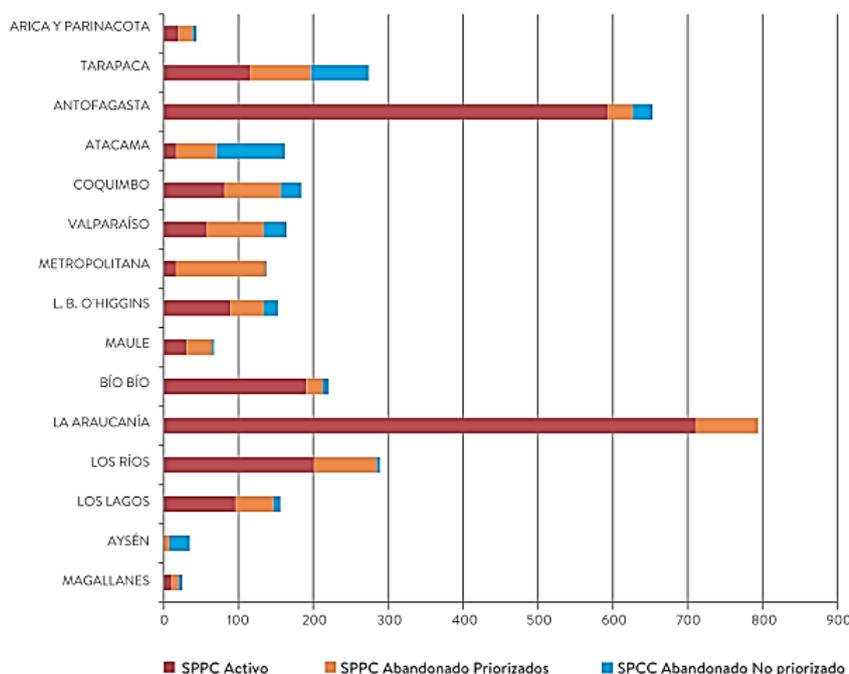


**Figura 7-6. Impacto de la desertificación y la erosividad en el territorio [25] y [26]**

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

En el caso de las regiones de estudio, la región de Antofagasta presenta una erosividad en el territorio muy baja lo cual es un aspecto para valorar de cara a plantear cambios de uso del suelo en el mismo. Sin embargo, el tema de la desertificación en esta misma región oscila entre leve, moderada y grave dependiendo del terreno. La región de Coquimbo también ofrece un grado de erosividad muy bajo a lo largo de toda la región, pudiendo presentar al sur de la misma un grado de erosividad algo más alto. La desertificación en esta región es bastante constante a lo largo de todo el territorio, siendo de grado moderado principalmente. Por último, la región del Libertador General Bernardo O'Higgins presenta un grado de erosividad que oscila entre moderado y bajo, siendo prioritariamente bajo. Y respecto a su grado de desertificación, presenta diferentes niveles en función del territorio estudiado oscilando entre moderado y leve, pudiendo encontrarse zonas con un nivel de desertificación grave.

**c. Contaminación de los suelos:** La contaminación de los suelos con sustancias que limiten sus capacidades o las anulen es otra forma de degradación. En el caso de Chile, la contaminación de los suelos proviene principalmente de las actividades agrícolas, industriales y mineras. A continuación, se muestra una gráfica que muestra los diferentes grados de suelos contaminados por regiones:



**Figura 7-7. Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPCC) [24]**

d. *Hidrología*

A nivel general, respecto a la hidrología del país se puede determinar que en términos de disponibilidad de agua puede considerarse un país rico en materia de recursos hídricos. Respecto al agua superficial procedente de los fenómenos de escorrentía se alcanzó un valor de 53.000 m<sup>3</sup>/persona/año, valor alto considerando que la media mundial alcanza el valor de 6.600. Si bien es cierto que este valor es muy variable provocando la escasez de agua en zonas como la norte y la central del país [27]. A continuación, se describe la situación hídrica tanto de agua superficial como de agua subterránea de Chile, concretamente de las tres zonas de estudio, para lo cual se ha contado con la información publicada por la Dirección General de Aguas (DGA) a través del Atlas del agua 2016 [28].

- a. Glaciares: La región de **Antofagasta** presenta una superficie cubierta del 0,03% del total del país, con una superficie de 7,2 km<sup>2</sup>. La región de **Coquimbo** contribuye al total con un porcentaje del 0,2% lo que equivale a una superficie de 46,9 km<sup>2</sup>. Y, por último, la región del **Libertador General Bernardo O'Higgins** presenta una superficie de 1,24% cubierta por glaciares o, lo que es lo mismo, una superficie 292,3 km<sup>2</sup>. En total, las tres zonas presentan un porcentaje de glaciares que no llega al 2% del total del territorio, de manera que no se considera que sean fenómenos de importancia en estas tres regiones de estudio.
- b. Ríos y escorrentía: En la región de **Antofagasta** se encuentra el río de mayor longitud de todo el país, el río Loa, que presenta una longitud de 440 km, sin embargo, se trata de uno de los menos caudalosos. En la región de **Coquimbo** se registran cuatro ríos que son el río Huasco que comparte localización con la región fronteriza de Atacama, el río Elqui, el río Limarí y el río Choapa. Por último, en la región de **Libertador General Bernardo O'Higgins** se registran el río Maipo, el río Rapel y el río Mataquito, los cuales comparten localización con otras regiones fronterizas.
- c. Lagos y lagunas: La región de **Antofagasta** presenta un área de 83 km<sup>2</sup> cubierta por lagos y lagunas lo que representa un 0,7% del total del país. La región de **Coquimbo** es de las que menos área de lagos y lagunas presenta con un área de 8 km<sup>2</sup>, lo que supone un 0,1% del total. Por último, la región de **Libertador General Bernardo O'Higgins** presenta un área de 20 km<sup>2</sup>, o lo que es lo mismo, un 0,2% del total.
- d. Acuíferos: La región de **Antofagasta** presenta ocho acuíferos, mientras que la región de **Coquimbo** recoge seis acuíferos en su territorio y, por último, la región del **Libertador General Bernardo O'Higgins** presenta once, siendo en porcentaje el 5,8%, 4,4% y 8,0% de total nacional, respectivamente.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- e. **Calidad del agua:** De acuerdo con el Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos publicado por el Banco Mundial en 2011 la falta de datos sistemáticos limita una evaluación exacta y detallada del alcance del estado de la calidad de las aguas y resulta un obstáculo para la gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, las estaciones repartidas a lo largo del territorio permiten evaluar ciertos parámetros y poder hacer una evaluación general del estado de los recursos hídricos. Las estaciones de calidad recogen información como el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto en la misma y la conductividad eléctrica<sup>2</sup>. A continuación, se recogen los aspectos destacados de cada uno de estos parámetros:
- **pH** → Tanto en la zona norte como en la centro, la mayoría de los recursos hídricos presentan pH neutro, siendo el porcentaje de los de la zona centro mayor (98%). En la zona austral todos presentan pH neutro.
  - **Temperatura** → La temperatura presenta un gradiente como cabe esperar, con valores normales de entre 10-1°C en la zona austral, 5-20°C en la sur y centro y, por último, 15-40°C en la zona norte.
  - **Oxígeno disuelto** → el oxígeno disuelto es un indicador de la buena calidad del agua, aunque se encuentra influenciado por otros parámetros como la temperatura. Los valores de oxígeno disuelto disminuyen de la zona austral a la norte.

La disponibilidad de recursos hídricos determina las zonas declaradas de agotamiento, parámetro que determina que ese recurso, ya sea un lago, laguna o río, la posibilidad de realizar actividades de aprovechamiento sobre el mismo. El mayor número de zonas declaradas de agotamiento por macrozonas lo presenta el Centro con 5 zonas declaradas que suponen 9.571 km<sup>2</sup>. En la región de **Antofagasta** se declaró zona de agotamiento el río Loa y sus afluentes en el año 2000 abarcando un área de 33.081 km<sup>2</sup>, además de la cuenca del río Vilama y sus afluentes (2017). En la región de **Coquimbo**, lo fue el río Elqui y sus afluentes (2015), el río Grande, el río Limarí y sus afluentes (2005) y, por último, el río Choapa y sus afluentes (2004). La región del **Libertador General Bernardo O'Higgins** presentó zonas de agotamiento en la primera sección del río Mapocho y sus afluentes en 1983 y el río Estero Chimbarongo y sus afluentes en 1999.

---

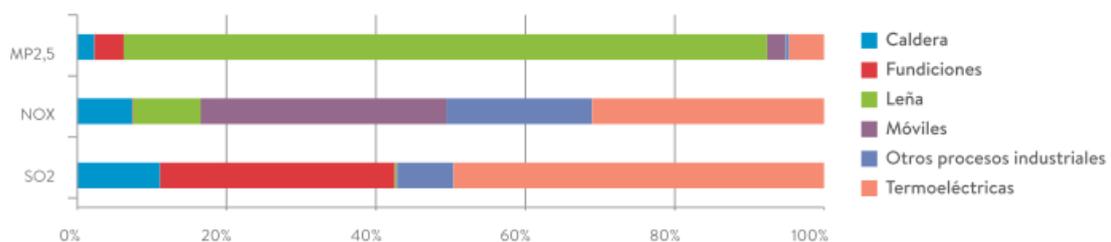
<sup>2</sup> Todos los datos hacen referencia al año 2016 y la fuente es la DGA

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

e. *Contaminación atmosférica*

La calidad del aire viene determinada por la contaminación atmosférica, la cual puede definirse como la presencia en la atmósfera de sustancias que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad o la salud de las personas, medioambiente y demás bienes de cualquier naturaleza [29]. Las sustancias consideradas contaminantes atmosféricos más comunes generadas por la acción de la producción de la energía y el transporte son el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NOx) y las partículas. De otros sectores como la agricultura y la ganadería, destaca el amoníaco (NH<sub>3</sub>). Todos estos se consideran contaminantes primarios, pero como contaminante secundario mencionar el ozono (O<sub>3</sub>) que tiene efectos negativos en la troposfera. Por último, los metales pesados y compuestos orgánicos volátiles (COVs) presentan elevado riesgo para el medio y la salud humana, debido a su persistencia y peligrosidad. La concentración y presencia de todos estos contaminantes atmosféricos van a determinar la calidad del aire de una región.

Respecto al territorio chileno, la macrozona Norte presenta una problemática asociada a la calidad del aire que se presenta como concentraciones elevadas de partículas, SO<sub>2</sub> y NOx los cuales provienen en gran medida de las centrales termoeléctricas, como las presentes en la zona de Atacama<sup>3</sup>, y de otras fuentes mineras. En la macrozona Centro, las emisiones al aire de contaminantes se deben a la actividad industrial, a las fuentes móviles y a las emisiones del sector residencial. Respecto a la macrozona Sur, se registran valores más altos en partículas durante los meses de invierno, consecuencia del consumo de leña en hogares para calefacción. A continuación, se muestra una tabla que refleja cuáles son las fuentes emisoras en porcentaje para el total de los principales gases emitidos.



**Figura 7-8. Contribución de las fuentes a la generación nacional de contaminantes (2017) [24]**

<sup>3</sup> <http://www.enelgeneracion.cl/es/conocenos/nuestronegocio/centrales/Paginas/chiletermo.aspx>



**Figura 7-9. Zonas Saturadas por la contaminación atmosférica [24]**

El material particulado (de 2,5 micras) se genera principalmente por la combustión de la leña en un 90% aproximadamente, mientras que el resto se distribuye en las centrales termoeléctricas, las fuentes móviles, las industrias de fundición, combustión en calderas y otros procesos. Los óxidos de nitrógeno son generados por las centrales termoeléctricas y las fuentes móviles de manera similar, seguido de otros procesos relacionados con la industria. Por último, con una contribución del 15% en total, la combustión por calderas y la leña. Las centrales termoeléctricas son las fuentes que más contribuyen a la concentración de SO<sub>2</sub> de la atmósfera, seguido por las industrias de fundición y la combustión por calderas.

El conjunto de normas respecto a la calidad del aire fija los parámetros de concentración entre los que deben encontrarse los contaminantes especificados, de no ser así se declara zona saturada. Además, se establecen los niveles de emergencia ambiental, es decir, rangos de concentraciones que superados se consideren de riesgo.

A continuación, se describen las tres regiones de estudio.

- **REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

La calidad del aire en esta región está afectada por las centrales termoeléctricas que se encuentran en la zona, las explotaciones mineras y fundiciones de cobre. Estas tres actividades industriales contribuyen a la contaminación atmosférica aumentando las concentraciones de material particulado, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Como consecuencia, a 2015, existían en la región de Antofagasta, cuatro zonas declaradas saturadas de PM<sub>10</sub> y una zona latente en elevadas concentraciones de SO<sub>2</sub>. De acuerdo con los datos de la calidad del aire se estableció un “Plan de Prevención de Descontaminación Atmosférica para la localidad de Huasco y su zona circundante” en el año 2016 considerando que se declaró zona latente en PM<sub>10</sub>. Por otro lado, en 2010 se estableció otro “Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Tocopilla y su zona circundante” [15].

- **REGIÓN DE COQUIMBO**

La región de Coquimbo presenta actividad minera por parte de la Minería Carmen de Andacollo y Los Pelambres. De cara a controlar estas emisiones se instalaron estaciones de monitoreo para la medición de PM<sub>2,5</sub> en el año 2013 en las zonas de Coquimbo y La Serena. Las

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

mediciones de estas estaciones vienen reportando niveles de concentraciones de PM<sub>2,5</sub> menores a los niveles fijados por la normativa. En las regiones de Andacollo se instalaron estaciones de medición de PM<sub>10</sub> desde que se registraron niveles de estas partículas por encima de los fijados por la norma. En 2009 se declaró la zona saturada en PM<sub>10</sub> y, como consecuencia, en 2014 se estableció un Plan de descontaminación de Andacollo [15]. Respecto al resto de contaminantes, las fuentes fijas son las responsables de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, mientras que las emisiones de PM<sub>10</sub> y CO son causadas por las fuentes móviles (tránsito de vehículos) y, por último, las emisiones de PM<sub>2,5</sub> son emitidas por las fuentes que consumen leña como combustible.

- **REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS**

La principal fuente emisora de la región del Libertador Bernardo O'Higgins es la Fundición Caletones de la División El Teniente Codelco, aunque desde hace años cumple con las metas propuestas por el Plan de Descontaminación, lo que ha venido contribuyendo a la disminución de la concentración de contaminantes atmosféricos, principalmente de los contaminantes SO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>. A 2015, la estación de Rancagua registró valores de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> por encima de los establecidos por la norma diaria. En cuanto al área de influencia de la fundición de Caletones, las medidas llevadas a cabo por esta empresa para alcanzar los retos establecidos por el Plan de Descontaminación [15] han generado que los días de superación de la norma diaria de concentración de SO<sub>2</sub> sean menos. Sin embargo, a pesar de estas reducciones las concentraciones anuales de SO<sub>2</sub> en 2015 estaban por encima de la norma anual fijada. Respecto a otros contaminantes atmosféricos, las concentraciones de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> han registrado valores por debajo de las normas.

Las descripciones detalladas de las zonas identificadas como posibles de cara al planteamiento de nuevas centrales nucleares de potencia permiten establecer una caracterización de la calidad del aire. A modo de resumen, en el norte predominan los contaminantes consecuencia de la actividad minera y de las fuentes de las centrales termoeléctricas. Estos contaminantes son partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, principalmente. En la zona centro las emisiones están relacionadas con la actividad industrial, las fuentes móviles, las emisiones procedentes del sector residencial y de centrales termoeléctricas, siendo los principales contaminantes atmosféricos predominantes las partículas y contaminantes fotoquímicos. En la zona sur, se observan altos niveles de partículas en los meses de invierno por el consumo de leña para calefacción de hogares [30].

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

f. Flora y fauna

La provisión de **servicios ecosistémicos** de la biodiversidad chilena es clave para el desarrollo económico del país y de sus habitantes. Los sectores que dependen directamente de los recursos naturales renovables, entre ellos la industria forestal, pesquera, agrícola y el sector turístico, dan cuenta del 9,7% del PIB del país y generan al menos un millón de empleos directos.

La biodiversidad de Chile (Figura 7-10) se caracteriza por un relativo alto endemismo de especies (22-25%) en ecosistemas diversos y de escaso tamaño, que albergan alrededor de 30.000 especies. La zona centro y sur de Chile es considerada como uno de los 35 *hotspots* mundiales de biodiversidad y clasificada también como una de las más amenazadas por la iniciativa Global 200 de WWF (*World Wildlife Fund*) y el Banco Mundial.

Chile cuenta con **ecosistemas** que proveen importantes servicios ecosistémicos, como es el caso de los sumideros de carbono. Concretamente los mayores sumideros de carbono se encuentran en la zona sur en la cual los bosques valdivianos representan una importante fuente de provisión de agua además de captura de carbono. Por otro lado, el gran ecosistema marino de la corriente de Humboldt, por su parte, provee alta productividad a las costas del país y los ecosistemas mediterráneos son de gran relevancia por los servicios que prestan para el desarrollo de la industria agrícola. Las áreas protegidas, por su parte, también representan una fuente importante de valor económico. Chile basa su economía en la explotación de recursos naturales y, sin considerar el sector minero, que aporta con un 12% al PIB del país y un 60% de las exportaciones totales. Los ecosistemas terrestres de Chile han experimentado una importante pérdida de superficie de bosque nativo, lo que ha sido especialmente evidenciado en la zona central, llegando a experimentar tasas de pérdida entre un 3,5% y 4,5% al año. Los ecosistemas antrópicos, por su parte, han incrementado a un 12% del territorio su superficie.



**Figura 7-10. Zonas destacadas en biodiversidad**

De acuerdo con lo publicado en el Informe del Estado del Medioambiente de Chile en 2016 (Figura 7-11) la región que presenta mayor cantidad de **ecosistemas en peligro** es la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Mientras que Coquimbo y Antofagasta el peor caso de conservación alcanza la categoría de vulnerable.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

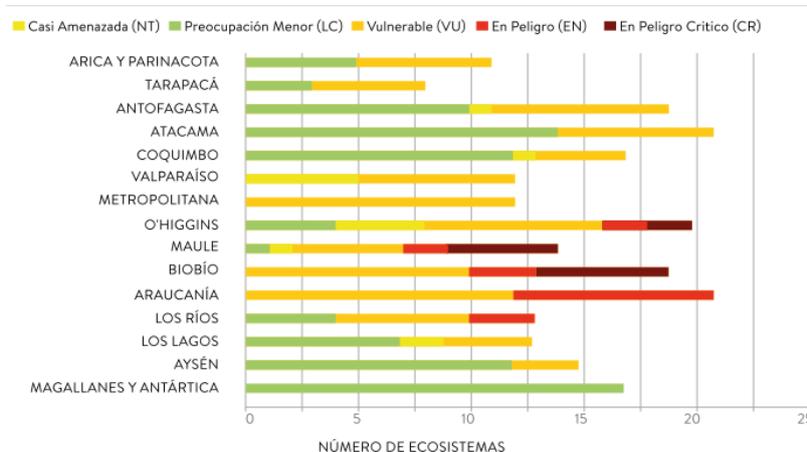


Figura 7-11. Estado de los ecosistemas terrestres por región, 2015 [31]

En el ámbito marino, no existe conocimiento suficiente que permita dar cuenta de la pérdida y/o alteración de los **ecosistemas marinos y costeros** ni las especies que los componen; tampoco existe una clasificación oficial que permita una adecuada planificación y gestión en torno a estos ecosistemas. El Índice de Salud General de los Océanos, estudio realizado a nivel global, señala que la biodiversidad marina de Chile y su estado de conservación se encuentra en un nivel “bueno” de conservación, no así mismo en cuanto con la provisión de alimento por las pesquerías y la acuicultura, lo cual da cuenta de la sobreexplotación que enfrentan las especies hidrobiológicas. En forma general, la información disponible indicaría que la condición ecológica es mejor hacia el sur de Chile y que empeora hacia la zona centro -en el caso de ríos y lagos- y hacia la zona norte del país. En el caso de las especies, si bien se ha ampliado el conocimiento de la biodiversidad de especies en Chile, existe un considerable desconocimiento de la biota presente, siendo los invertebrados y los peces los grupos menos conocidos [31].

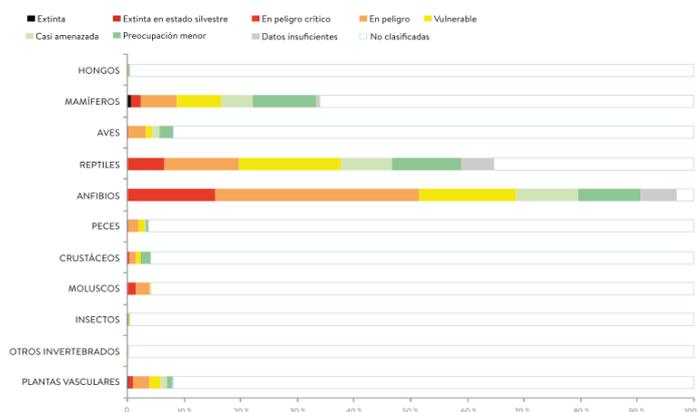


Figura 7-12. Porcentaje de especies clasificadas, 2015 [31]

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

El **cambio de uso de los suelos** constituye el principal factor antrópico que ha ocasionado cambios en los ecosistemas terrestres naturales del país, siendo las actividades desarrolladas por la industria forestal -a través de la tala irregular de los bosques y las plantaciones con especies exóticas, por la industria agrícola - a través del despeje de bosques para el establecimiento de pastizales y cultivos- y por la urbanización, las mayores amenazas para estos cambios.

Respecto al impacto sobre servicios ecosistémicos y el bienestar humano, pese a que se ha evidenciado la pérdida creciente de tierras de alto valor en biodiversidad que son refugio de biota nativa, no se cuenta con información de estudios que hayan podido determinar impactos en servicios asociados a la sustitución de vegetación nativa por plantaciones forestales y avance de la frontera agrícola. Sin embargo, sí se han identificado determinados servicios críticos en la zona centro y sur, tales como el servicio de captura de carbono y de refugio de hábitat, entre otros, y existe la noción del impacto sobre el servicio de provisión de agua en la zona norte del país, producto del desarrollo de industrias productivas. En el ámbito marino, por su parte, estaría afectado el servicio provisión de especies comerciales [32].

*g. Demografía*

Chile es un país dividido administrativamente en 15 regiones y con más de 18 millones de habitantes. Según las proyecciones demográficas [33], la población en Chile estimada al 30 de junio de 2015 fue de 18 millones de habitantes (18.006.407), de los cuales un 49,5% correspondió a población masculina y un 50,5%, a población femenina. En concordancia con la ocupación histórica del territorio, las regiones de Valparaíso, Bío Bío y Metropolitana de Santiago son las que concentran la mayor parte de la población, con un 62,5% de ella (11.254.219 personas). La Región Metropolitana de Santiago, que alberga a la capital nacional, es la más poblada de Chile, con 7,3 millones de personas aproximadamente, lo que corresponde a un 40,7% de la población total del país.

En contraste, y también respondiendo al poblamiento histórico del país, las regiones extremas son las menos pobladas. Se estima que en el norte, Arica y Parinacota y Tarapacá concentran un 1,3% y 1,9% de la población nacional, respectivamente, sumando 575.895 personas; por otro lado, en el extremo sur, Aysén y Magallanes y de la Antártica Chilena concentran un 0,6% y un 0,9% de la población del país, respectivamente, sumando un estimado de 272.989 personas.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**Tabla 7-4. Poblaciones publicadas por el INE para el año 2017<sup>4</sup>**

Región	Población
<i>Antofagasta</i>	607.534
<i>Coquimbo</i>	757.586
<i>Libertador General Bernardo O'Higgins</i>	914.555

Chile presenta bajos niveles de fecundidad y mortalidad, en la actualidad se reflejan en una tasa bruta de natalidad de 13,6 por mil, una tasa global de fecundidad de 1,79, una tasa de mortalidad infantil de 6,9 por mil y una tasa bruta de mortalidad de 5,7 por mil. Estos bajos niveles se manifiestan tras un declive sostenido de más de 60 años aproximadamente, que finalmente se han traducido en el envejecimiento paulatino de la población. Esto se ve reflejado en la esperanza de vida al nacer, la que presenta valores de 77,1 años para los hombres y 82,7 años para las mujeres, y en el aumento sostenido del peso relativo de la población adulto mayor, que actualmente representa casi al 15% del total del país.

*h. Sector agropecuario*

El sector agropecuario ha sido un sector fuertemente influenciado por la exportación de productos, lo cual ha influido en su desarrollo generando consecuencias en los tipos de asentamiento de suelo, el impacto ambiental del sector, etc. La distribución del sector agropecuario se da a lo largo de todo el país, aunque hay zonas que concentran ciertas actividades relacionadas con este sector. En la **Tabla 7-5** se detalla el número de explotaciones presentes en las regiones en el año 2007, así como su superficie dedicada a labores agrícolas y totales.

**Tabla 7-5. Características del sector agropecuario en Chile, Censo 2007 [34]**

Regiones	N.º explotaciones	Explotaciones sobre el total	Superficie agrícola utilizada	Superficie total de explotaciones
		%	ha	ha
<i>Antofagasta</i>	2.000	1%	668.335	720.457
<i>Coquimbo</i>	15.777	5%	3.262.067	4.006.060
<i>O'Higgins</i>	25.249	8%	777.020	1.609.564
<b>Total País</b>	<b>301.376</b>	<b>100%</b>	<b>18.473.128</b>	<b>51.695.733</b>

<sup>4</sup> <https://resultados.censo2017.cl/>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

De acuerdo con el último censo realizado la región con mayor actividad agropecuaria en general es la región Bío Bío en cuanto a número de explotaciones.

En cuanto a la actividad ganadera, predomina la faena porcina sobre el resto en todo el territorio, alcanzando en 2016, 2.752.035 cabezas. En la categoría de ganado bovino, la región Los Lagos es la que más actividad presenta con una presencia de 894.998 cabezas en el año 2015. [35].

**Tabla 7-6. Actividad ganadera en las zonas de estudio**

	Ganadería bovina	Ganadería ovina	Ganadería caprina
<b>Antofagasta</b>	NR <sup>5</sup>	NR	NR
<b>Coquimbo</b>	NR	NR	249.989 cabezas
<b>Libertador General Bernardo O'Higgins</b>	60.491 cabezas	131.622 cabezas	18.000 cabezas

---

<sup>5</sup> NR = No Reseñable

**7.2.2. Efectos sobre el ecosistema y los recursos**

**a. Disminución de recursos minerales**

*Categoría de impacto ambiental que se refiere al uso de recursos minerales*

**Tabla 7-7. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Disminución de recursos minerales	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>La disminución de recursos minerales en la industria nuclear está relacionada fundamentalmente con la extracción de uranio. Este elemento es la base del combustible nuclear y está presente en la naturaleza en proporciones finitas. De ahí que esta categoría de impacto sea la más penalizante. En un hipotético caso en el que se emplazara una central nuclear en el territorio chileno, el impacto asociado a esta categoría dependería del lugar de la extracción minera, que puede ser o no el propio país. Independientemente de esto, la disminución de recursos minerales afecta a todo el planeta y es un factor inherente a la generación nuclear.</p> <p>Además del uranio, la construcción y puesta en marcha de las centrales precisa de otra serie de recursos minerales fundamentalmente orientada a la extracción de tierras raras.</p>	<b>ALTO</b>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**b. Ecotoxicidad del agua (marina y dulce)**

*Categoría que recoge los impactos tóxicos que afectan a los medios hídricos, nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.*

**Tabla 7-8. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Ecotoxicidad del agua	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>Como consecuencia de la operación normal de la planta se generan una serie de residuos químicos y radiactivos que se vierten el medio hídrico. La concentración de estos materiales está controlada y regulada según la normativa vigente de cada país. El modelo de dilución que rige el comportamiento de estos materiales una vez descargados al medio depende del tipo de sistema de refrigeración (mar, río, embalse...). Por ello, a la hora de estudiar el <i>site selection</i> de una posible planta nuclear esta categoría es un criterio para valorar. Por otro lado, recurrir a masas de agua para abastecer las necesidades de refrigeración de las plantas tiene una consecuencia sobre la temperatura del medio acuático. Atendiendo a las características de la hidrología chilena actual, esta Efecto tendría mayores consecuencias en los medios hídricos con peores niveles de calidad, que coincide con las regiones que se encuentran más al norte (la calidad del agua empeora de sur a norte actualmente).</p>	<p>MODERADO</p>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**c. Ocupación y transformación del terreno agrícola y urbano**

*Esta categoría recoge el impacto por el uso (ocupación) de una superficie de suelo por diferentes actividades.*

**Tabla 7-9. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Ocupación y transformación del terreno	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>La ocupación y transformación del terreno es inherente a cualquier actividad. La contribución de esta categoría depende del tipo de actividad. En concreto, en el sector nuclear, el tipo de tecnología (SMR, HWR, PWR...) e incluso el diseño de la planta influye en el grado de impacto en cuanto a ocupación del suelo se refiere. Concretamente, la tecnología del tipo HWR presenta una mayor necesidad de uso del suelo ya que necesita de un terreno adicional para la planta de producción de dicha agua.</p> <p>En cuanto al posible emplazamiento de la planta en el territorio chileno es preferible priorizar zonas libres de bosque nativo o terrenos agropecuarios de explotación actual o posible explotación futura, como puede ser la zona norte. Del mismo modo, es importante tener en consideración las zonas con un grado de erosividad alto con el fin de evitar su agravamiento.</p>	<p><b>MEDIO</b></p>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**d. Acidificación terrestre**

*Categoría que recoge los efectos debidos a la presencia de sustancias acidificantes en la superficie terrestre.*

**Tabla 7-10. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Acidificación terrestre	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>En algunas fases del ciclo de combustible, principalmente la minería y la molienda, se utilizan compuestos químicos de naturaleza ácida lo cual puede provocar que se produzcan acumulaciones de los mismos en el terreno de la actividad.</p> <p>El estado de la calidad del suelo es primordial a la hora de estudiar el impacto de la acidificación del mismo ya que éste tiene cierta capacidad de neutralización que se pierde si su equilibrio está afectado. Concretamente en el territorio chileno sería conveniente evitar las zonas con elevada actividad industrial y minera por las consecuencias que esto produce en los suelos en el caso de que las fases de minería y molienda del uranio se realizaran en el territorio.</p>	MEDIO

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**e. Disminución de recursos fósiles**

*Categoría de impacto ambiental que se refiere al uso de recursos fósiles*

**Tabla 7-11. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Disminución de recursos fósiles	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>La fase que más energía requiere de todo el ciclo de combustible es el enriquecimiento del uranio. Esto lleva asociado unos impactos por el consumo de combustibles fósiles debido al origen de esa energía empleada. En todos los procesos que requieran de un medio de transporte para el abastecimiento o para suministro existe un impacto asociado a la disminución de recursos fósiles.</p> <p>Dado que las distintas fases del ciclo de combustible pueden tener lugar o no dentro del territorio chileno el impacto de esta categoría queda relativizado según la localización de cada una de estas fases.</p>	MEDIO

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**f. Eutrofización del agua (marina y dulce)**

*Esta categoría refleja el efecto de los nutrientes a vertidos de agua que aceleran el crecimiento de las algas y demás vegetación en el agua.*

**Tabla 7-12. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Eutrofización del agua	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>Durante la minería de uranio se emplean agentes químicos necesarios para extraer y acondicionar el mineral. En la fase de operación se requieren detergentes para la limpieza de los tubos del generador. Estos productos químicos pueden contribuir a la eutrofización del agua por la adición de elementos como fósforo y nitrógeno que actúan de nutrientes en el medio afectando al equilibrio biótico del agua.</p> <p>De acuerdo con los estudios de calidad del agua en Chile, se puede concluir que la calidad de los medios hídricos empeora hacia el norte, siendo un parámetro crítico para evaluar.</p>	MEDIO

**g. Cambio climático**

*Categoría de impacto que refleja el potencial de calentamiento global como la capacidad de un gas de efecto invernadero de influir en el forzamiento radiactivo, expresada en términos de una sustancia de referencia y de un horizonte temporal. Relacionado con la capacidad de influir en los cambios de la temperatura media mundial en la interfaz superficie-aire y en parámetros climáticos y sus efectos.*

**Tabla 7-13. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Cambio climático	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>De la misma manera que la categoría de impacto de disminución de recursos fósiles, el cambio climático se encuentra asociado a los procesos de transporte y de consumos de energía de fuentes fósiles. En el sector nuclear, la mayor contribución al cambio climático se limita a los procesos en los que se requieran combustibles como el transporte de suministros, maquinaria para la minería y molienda, etc.</p> <p>El cambio climático se trata de una problemática ambiental a escala global que no es posible particularizar a una localización concreta.</p>	<b>BAJO</b>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**h. Ecotoxicidad terrestre**

*Categoría que recoge los impactos tóxicos que afectan a la superficie terrestre, nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.*

**Tabla 7-14. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Ecotoxicidad terrestre	
<i>Efecto sobre los recursos y los ecosistemas</i>	<i>Grado</i>
<p>Durante los procesos de fabricación del combustible se emplean productos de diferente naturaleza química que pueden llegar a suponer un riesgo al medio. Sin embargo, estos son principalmente de naturaleza ácida durante los procesos de minería que contribuyen en mayor medida a la acidificación terrestre.</p> <p>De la misma manera que la acidificación terrestre la contribución al territorio chileno de esta categoría dependerá del estado del suelo en el que se produzca la contaminación. Si bien es cierto, que la zona norte presenta un mayor número de actividades industriales y mineras que contribuyen a la contaminación del suelo, la degradación del mismo en el territorio se da principalmente por la erosión. Es por esto por lo que se deberían evitar zonas industriales que contribuyan a una contaminación del suelo.</p>	BAJO

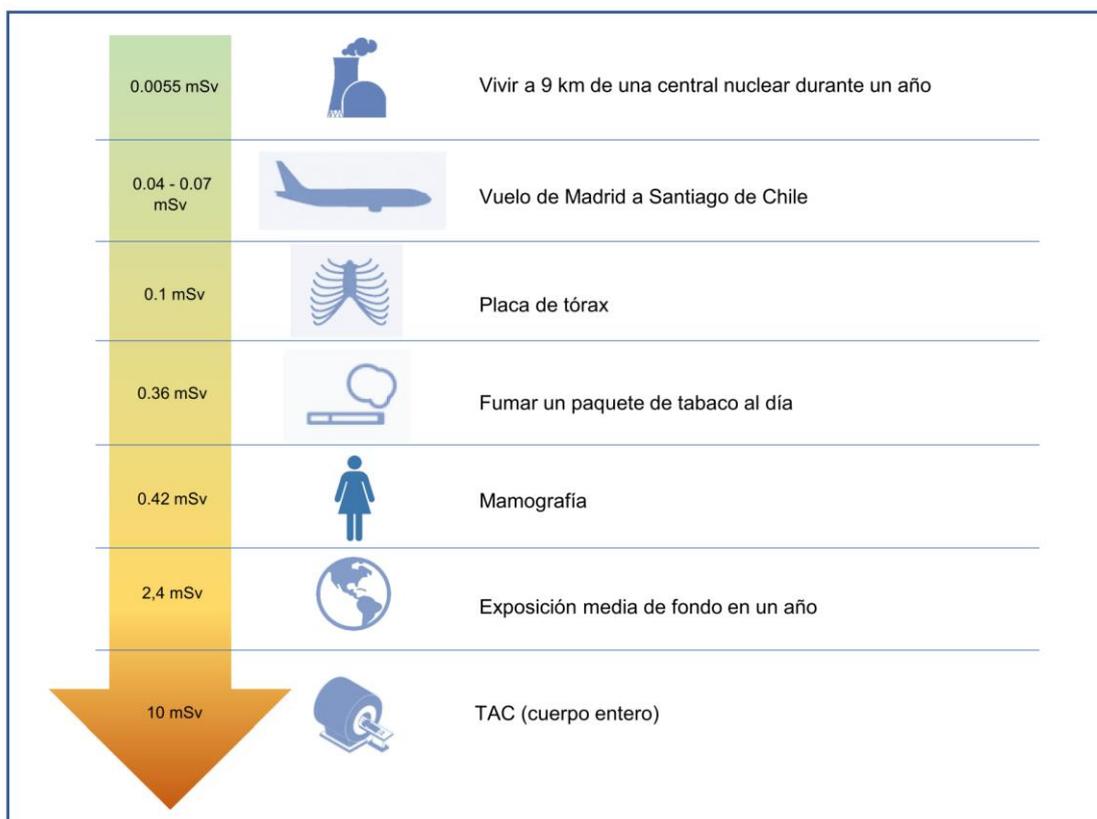
Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

### 7.2.3. Efectos sobre la salud humana

#### a. Radiación

*Esta categoría hace referencia a los efectos nocivos sobre la salud humana debido a sustancias radiactivas.*

**Figura 7-13. Comparativa de dosis de radiación debida a causas artificiales o antropogénicas [36] [37] [38].**



En circunstancias de operación normal, marco en el que se desarrolla el presente estudio, las dosis de radiación al público como consecuencia de la producción eléctrica en Centrales Nucleares son muy bajas. Los efectos biológicos de la radiación se clasifican en: efectos estocásticos y efectos deterministas. Los efectos estocásticos, como su nombre indica, son de naturaleza estadística. Este tipo de efectos no poseen un umbral de dosis, son heredables y su gravedad es independiente de la dosis. Los efectos deterministas se producen por encima de una dosis umbral, su gravedad es dependiente de la dosis y son somáticos. Por lo tanto, incluso

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

a dosis bajas, la probabilidad de aparición de efectos estocásticos no es nula. Para dosis muy bajas existen distintos modelos que relacionan la dosis con los efectos sobre la salud sin que exista una aproximación definitiva y unificada para estos niveles tan bajos. En el rango de las de dosis que se muestran en la Figura 7-13, los efectos sobre la salud humana son difíciles de discriminar con respecto a los efectos que acarrearán otra serie de hábitos o costumbres de la población que tienen incidencia sobre la salud. Por ello, es difícil asegurar la existencia de una relación causal directa entre la exposición a estos niveles de radiación y los posibles efectos que puedan aparecer en una población aledaña a la central. Por otro lado, todas las situaciones planteadas en la Figura 7-13 son ejemplos de dosis bajas. La contextualización de la exposición en operación normal se realiza al comparar las dosis debidas a otras situaciones de exposición a radiaciones ionizantes.

**Tabla 7-15. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Radiación	
<i>Efectos sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
<p>La radiación es uno de los principales impactos de la industria nuclear sobre el medio y las personas. En operación normal, su origen proviene de las emisiones controladas de efluentes líquidos y gaseosos. Durante otras fases de la vida de la central como el desmantelamiento los materiales radiactivos proceden de los residuos y de los productos de activación en estructuras y sistemas. En el caso del ciclo de combustible, los materiales radiactivos provienen del propio mineral de uranio y su posterior transformación.</p> <p>De cara a minimizar el impacto de esta categoría en un posible emplazamiento futuro en el territorio chileno, el <i>site selection</i> ha de contemplar localizaciones lejanas a núcleos urbanos y puntos de gran afluencia de personas como lugares de interés turístico o áreas recreativas. No obstante, como se ha detallado anteriormente, las emisiones de radiación en todo el proceso nuclear son controladas y se encuentran restringidas bajo unos umbrales de dosis y concentración.</p>	<p><b>MODERADO</b></p>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**b. Toxicidad humana**

*Categoría de impacto que recoge los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a la absorción de sustancias tóxicas mediante la inhalación de aire, la ingesta de alimentos o agua, o la penetración a través de la piel.*

**Tabla 7-16. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Toxicidad humana	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
<p>Los efluentes líquidos y gaseosos de naturaleza radiactiva o productos químicos de desecho que se liberan en la operación normal de la planta pueden llegar a afectar a la salud humana a través de vías directas (inhalación o irradiación) o indirectas (ingestión) a través de medios contaminados.</p> <p>Este impacto sobre el territorio chileno dependerá de la cercanía a núcleos poblacionales y núcleos de actividades recreativas. Además, es importante considerar si el emplazamiento de las actividades es foco de migraciones estivales o periodos de recreo vacacional. En el caso del territorio chileno el objetivo se pondría en zonas poco densas en población y alejadas de los núcleos haciendo que este impacto se vea mitigado en cierta medida.</p>	MODERADO

**c. Formación de partículas**

Corresponde a los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a las emisiones de partículas y sus precursores (NOx, SOx, NH3). Pequeñas partículas con menos de 10 micras de diámetro.

**Tabla 7-17. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Formación de partículas	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
<p>La mayor parte de las partículas generadas en la industria nuclear se produce en determinadas fases iniciales del ciclo de combustible como son la minería y la molienda, la conversión y el enriquecimiento. También es posible que durante la fase de construcción de la planta se generen cantidades significativas de partículas. Por otro lado, los consumos de combustibles fósiles asociado a los procesos de transporte también contribuyen a la formación de partículas.</p> <p>El impacto de la formación de partículas en el territorio chileno agravaría en las zonas con concentración alta por la presencia de otras industrias o minerías emisoras de partículas. Por lo tanto, una buena práctica para limitar el agravamiento de los impactos de la formación de partículas es evitar zonas de saturación del aire por estos elementos además de zonas de elevada densidad poblacional, para evitar saturaciones y efectos sobre las personas.</p>	<p><b>MEDIO</b></p>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

#### **d. Formación fotoquímica de ozono**

*La formación de ozono a nivel del suelo de la troposfera, debida a la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles y de monóxido de carbono en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar.*

**Tabla 7-18. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Formación fotoquímica de ozono	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
<p>Los procesos relacionados con la fabricación del combustible tienen asociado emisiones de contaminantes primarios que pueden dar lugar a ozono por la acción de la radiación. Estos contaminantes están relacionados indirectamente con los consumos energéticos que requieran de fuentes fósiles, concretamente, la fase del enriquecimiento supone un consumo energético muy elevado contribuyendo al consumo de dichos combustibles.</p> <p>En el territorio chileno se ha llevado a cabo estudios que ponen en relieve en algunos puntos la elevada concentración de ozono llegando a superar (como en el valle de Santiago) los niveles fijados por la norma. Evitar emplazar las actividades emisoras en zonas con concentraciones elevadas en ozono es una buena práctica de cara a no agravar esta problemática.</p>	<p><b>MEDIO</b></p>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**e. Cambio climático**

*Categoría de impacto que refleja el potencial de calentamiento global como la capacidad de un gas de efecto invernadero de influir en el forzamiento radiactivo, expresada en términos de una sustancia de referencia y de un horizonte temporal. Relacionado con la capacidad de influir en los cambios de la temperatura media mundial en la interfaz superficie-aire y en parámetros climáticos y sus efectos.*

**Tabla 7-19. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Cambio climático	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
La contribución al cambio climático en el sector nuclear se limita al uso de combustibles para maquinaria, minería, molienda, etc. Al tratarse de consumos puntuales y no en operación habitualmente suponen un grado bajo y los efectos sobre la salud humana por esta categoría no se pueden considerar factores de riesgo en comparación con otras categorías de impacto.	<b>BAJO</b>

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

**f. Destrucción de la capa de ozono**

*Categoría de impacto que corresponde a la degradación del ozono estratosférico debida a las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono como, por ejemplo, gases de vida larga que contienen cloro y bromo.*

**Tabla 7-20. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Destrucción de la capa de ozono	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado</i>
La destrucción de la capa de ozono está relacionada con el uso de algunas sustancias químicas. Concretamente en el sector nuclear, el uso de estas sustancias no supone un impacto significativo por lo que los efectos sobre la salud humana por estos procesos tampoco.	BAJO

**g. Disminución de recursos hídricos**

*Categoría de impacto ambiental que se refiere al uso de agua.*

**Tabla 7-21. Evaluación del impacto sobre el medio como consecuencia de generación de energía con origen nuclear**

Disminución de recursos hídricos	
<i>Efecto sobre la salud humana</i>	<i>Grado<sup>6</sup></i>
<p>Durante la fase de construcción, puesta en marcha, operación y desmantelamiento se necesita un consumo de agua. El uso de esta agua está destinado fundamentalmente a tareas de refrigeración en operación normal y como depósitos en situaciones de emergencia. También tiene otras aplicaciones como fuente de agua desmineralizada, agua sanitaria, agua de limpieza...</p> <p>El recurso hídrico de Chile es lo suficientemente robusto como para asumir tecnologías de generación nuclear con dicha demanda de agua.</p>	-

**7.2.4. Medidas técnicas y administrativas aplicables**

Las tres categorías de impacto más relevantes en cuanto a su contribución sobre los efectos ambientales son: la disminución de recursos minerales, la ecotoxicidad del agua y la radiación.

Las medidas para mitigar la disminución de recursos son, principalmente, de carácter técnico y afectan de manera determinante al ciclo de combustible. Todas estas medidas están encaminadas a mejorar y optimizar el uso del combustible nuclear, así como desarrollar nuevas alternativas a los ciclos convencionales. Algunas de estas medidas técnicas son:

- Mejora de la eficiencia del ciclo de combustible: alargamiento del ciclo de quemado.

<sup>6</sup> El grado de impacto de esta categoría no es posible conocerlo ya que el método de cálculo ReCiPe no ofrece valores de normalización para esta categoría

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- Reprocesado del combustible.
- Diseños avanzados de combustible.
- Cambio de materia prima: energía nuclear basada en el ciclo del torio

Por otro lado, muchos países de referencia como Reino Unido, Francia y Estados Unidos regulan la ecotoxicidad del agua se regula mediante la implantación de *Best Available Techniques* que controlan y limitan la emisión de productos potencialmente contaminantes al medio acuático. Asimismo, existe un control sobre la temperatura del agua donde se producen las descargas durante la operación de la central nuclear con el fin de minimizar el impacto sobre el ecosistema. De forma adicional, existen directivas de los reguladores pertinentes que pretenden controlar este tipo de emisiones como de si se tratase de cualquier otro tipo de industria.

Finalmente, el impacto de la radiación sobre las personas y el medioambiente constituye una de las peculiaridades de la generación nucleoelectrónica que se transmite a la opinión pública como una de las principales preocupaciones. La solución que implanta la industria nuclear desde la legislación de cada país o las recomendaciones emitidas por organismos internacionales con el fin de mitigar el impacto de la radiación sobre las personas y el medioambiente consiste en establecer una serie de límites legales que aplican a todas las fases de la vida de la central nuclear y el ciclo de combustible. El establecimiento de estos límites proviene de normativas internacionales que adoptan de manera común los distintos países por lo que, generalmente, no suelen diferir unos de otros. En el análisis se han consultado las referencias de la IAEA, EURATOM, Estados Unidos y España. Estas medidas están alineadas con los objetivos de la Protección Radiológica de manera que el fin de todas ellas sea garantizar la protección de las personas y el medioambiente frente a los efectos no deseados de las radiaciones ionizantes.

### **7.3. Comparativa con otras tecnologías de generación eléctrica**

#### **7.3.1. Breve descripción de otras tecnologías eléctricas**

- **Térmicas convencionales:** Las centrales térmicas convencionales producen energía eléctrica a partir de combustibles fósiles como el carbón, fuel oil o gas natural. Además, utilizan tecnologías clásicas para la producción de electricidad, es decir, mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor. El funcionamiento de una central térmica convencional es el mismo para todas independientemente del combustible que se emplee para la producción de la energía. Los principales componentes de una central térmica son la caldera, la turbina de vapor y el generador.
- **Ciclo combinado:** Una central térmica de ciclo combinado es aquella que genera la electricidad mediante el uso de dos turbinas: un turbo grupo de gas y un turbo grupo de vapor. Esto quiere decir que superpone dos tipos de ciclo que son el ciclo de Bryton, en el caso de la turbina de gas, y el ciclo de Rankine, en el caso de la turbina de vapor. Las partes principales que conforman una planta de ciclo combinado son la turbina de gas, la caldera de recuperación y la turbina de vapor.
- **Centrales hidroeléctricas:** Las centrales hidroeléctricas son instalaciones que permiten aprovechar la energía potencial gravitatoria (masa de agua a una cierta altura) contenida en el agua de los ríos, al convertirla en energía eléctrica mediante turbinas hidráulicas acopladas a generadores eléctricos.
- **Centrales fotovoltaicas:** El elemento básico de una central fotovoltaica es el conjunto de células fotovoltaicas, que captan la energía solar, transformándola en corriente eléctrica continua mediante el efecto fotoeléctrico. Están integradas, primero, en módulos y luego se forman con ellos los paneles fotovoltaicos. Lógicamente, la producción de electricidad de dichas células depende de las condiciones meteorológicas existentes en cada momento, fundamentalmente de la insolación. Dichas condiciones son medidas y analizadas con la ayuda de una torre meteorológica. Como la energía eléctrica que circula por la red de transporte lo hace en forma de corriente alterna, la corriente continua generada en los paneles solares debe ser transformada a corriente alterna. Es conducida, entonces, primeramente, a un armario de corriente continua, para ser convertida en corriente alterna por medio de un inversor y ser finalmente transportada a un armario de corriente alterna. Posteriormente, la energía eléctrica producida pasa por un centro de transformación donde se adapta a las condiciones de intensidad y tensión de las líneas de transporte para su

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

utilización en los centros de consumo. En función de la composición de los paneles fotovoltaicos existen diferentes tipos: paneles de silicio monocristalino, de silicio policristalino, de silicio de película fina, de silicio amorfo y otros paneles de película fina.

- **Centrales eólicas:** La energía eólica produce la transformación en electricidad a través de los aerogeneradores. Un aerogenerador eléctrico es un sistema que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Para ello, utiliza unas palas, que conforman la "hélice", y que transmiten la energía del viento al rotor de un generador. Generalmente se agrupan en un mismo emplazamiento varios aerogeneradores, dando lugar a los llamados parques eólicos. Dado el carácter aleatorio de la producción de energía eléctrica por vía eólica, las centrales de este tipo deben disponer de una fuente auxiliar para tener garantizado en todo momento el suministro de energía eléctrica. Debido a la altura en la que se encuentra el generador y al rozamiento que el aire produce sobre éste, es conveniente que el equipo tenga una toma a tierra, para evitar la electricidad estática. Asimismo, para el control de la velocidad del generador existen tecnologías que permiten regular, dentro de unos límites, las revoluciones de las palas, independientemente de la velocidad del viento.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

7.3.2. Tabla comparativa con otras tecnologías eléctricas

Categorías de impacto	Unidad	LWR CA	SMR CA	HWR CA	LWR CC	SMR CC	Térmica convencional carbón	Ciclo combinado gas natural	Ciclo combinado gas natural con CC	Hidroeléctrica	Fotovoltaica	Eólica
Fuente		propia	propia	propia	propia	propia	1	3	2	3	3	3
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	3,40E-02	4,01E-02	7,71E-02	2,74E-02	2,86E-02	7,60E-01	5,27E-01	2,47E-01	4,22E-02	3,09E-02	1,03E-02
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	2,18E-09	2,59E-09	4,47E-09	2,11E-08	1,81E-09	1,67E-09	-	-	-	-	-
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	4,45E-04	5,41E-04	5,37E-04	3,46E-04	3,97E-04	4,23E-03	3,78E-03	4,68E-03	2,39E-04	2,13E-04	6,54E-05
Eutrofización del agua	kg P eq	9,35E-07	7,43E-07	2,53E-06	8,19E-07	4,36E-07	9,85E-05	5,40E-06	1,01E-05	2,06E-06	6,97E-05	7,60E-06
Eutrofización marina	kg N eq	8,08E-05	1,00E-04	6,29E-05	6,02E-05	7,26E-05	7,31E-04	-	-	-	-	-
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	8,06E-02	1,00E-01	5,87E-02	6,11E-02	7,50E-02	9,72E-02	8,80E-02	1,12E-01	4,32E-03	3,71E-02	1,53E-02
Formación fotoq. de ozono	kg NMVOC	6,64E-04	8,19E-04	6,01E-04	5,08E-04	6,08E-04	5,90E-03	6,17E-04	7,68E-04	4,16E-04	1,05E-04	6,00E-05
Formación de partículas	kg PM10 eq	2,23E-04	2,57E-04	3,84E-04	1,71E-04	1,84E-04	1,45E-03	7,57E-04	9,16E-04	1,13E-04	6,44E-05	1,57E-04
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	2,34E-06	1,75E-06	1,35E-05	1,80E-06	8,01E-07	6,75E-06	6,31E-03	8,12E-03	1,07E-04	1,40E-03	3,79E-04
Ecotoxicidad del agua	kg 1,4-DB eq	1,25E-03	1,57E-03	9,28E-04	9,49E-04	1,17E-03	2,74E-03	-	-	-	-	-
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	1,26E-03	1,57E-03	9,28E-04	9,51E-04	1,17E-03	2,61E-03	-	-	-	-	-
Radiación	kg U235 eq	1,26E+00	1,50E+00	1,16E+00	6,34E-01	5,62E-01	3,43E-03	-	-	-	-	-
Ocupación de terreno	m <sup>2</sup> a	3,94E-03	4,78E-03	3,08E-03	3,10E-03	3,66E-03	1,85E-03	4,88E-04	6,75E-04	1,53E-02	9,88E-03	2,86E-04
Transformación de suelo natural	m <sup>2</sup>	8,48E-06	1,05E-05	1,91E-05	6,54E-06	7,55E-06	4,08E-06	-	-	-	-	-
Disminución de recursos hídricos	m <sup>3</sup>	5,00E-02	3,66E-02	2,13E-01	5,07E-02	1,85E-02	1,18E-04	-	-	-	-	-
Disminución de recursos minerales	kg Fe eq	2,16E-01	2,69E-01	1,52E-01	1,63E-01	2,02E-01	1,32E-03	2,56E-04	5,21E-04	2,44E-03	1,09E-02	8,84E-03
Disminución de recursos fósiles	kg oil eq	1,06E-02	1,26E-02	2,40E-02	8,43E-03	9,12E-03	1,93E-01	-	-	-	-	-

## 8. CONCLUSIONES

Las conclusiones alcanzadas tras analizar los resultados obtenidos del ACV se pueden agrupar en los siguientes puntos:

- Las tecnologías de generación nucleoelectrica más ventajosas en términos ambientales son SMR y PWR ciclo cerrado. Esto se debe al aprovechamiento del residuo como combustible, eliminando así del ciclo de vida cierta proporción de residuos y requiriendo menos cantidad de uranio primario o “virgen” para la misma producción energética.
- En todas las tecnologías evaluadas la distribución de los impactos similar. Salvo HWR, ya que muestra mayores contribuciones a transformación de suelo natural, formación de partículas y cambio climático por la producción de agua pesada, concretamente, al proceso de construcción de la planta de producción y a la energía necesaria para su obtención.
- A menor potencia instalada, la tecnología en cuestión presenta una menor eficiencia energética. El ACV contempla esta relación entre la eficiencia energética y la potencia instalada, por lo que en los resultados los reactores SMR operando en ciclo abierto resultan ser la tecnología más penalizada. No obstante, este análisis no considera otros posibles beneficios de esta tecnología.
- El proceso más contribuyente a las categorías de impacto es la minería y la fabricación de concentrados debido a la explotación de un recurso mineral no renovable, del consumo energético que requiere todo el proceso y de la contaminación de aguas como consecuencia de las actividades en los emplazamientos mineros.
- Categorías de impacto destacadas → disminución de recursos minerales, radiación, ecotoxicidad del agua y transformación del suelo

Los resultados del ACV de las tecnologías de generación nucleoelectrica se pueden poner en contexto con los puntos críticos identificados a nivel general para todas las alternativas de generación de electricidad.

- **Punto crítico 1** → Emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes al aire

Actualmente, los esfuerzos en materia de medio ambiente y energía se están centrando en la mitigación de la contribución al cambio climático por parte de la generación de electricidad. Otra problemática estrechamente relacionada con el cambio climático y la producción eléctrica es el consumo de recursos fósiles.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

En este aspecto, la generación nuclear se presenta como una gran alternativa respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta tecnología de generación eléctrica, según la identificación de impactos llevada a cabo mediante el ACV, no contribuye de manera significativa al cambio climático debido a las bajas emisiones de gases de efecto invernadero ya que no depende de la combustión de recursos fósiles para la producción de energía.

- **Punto crítico 2** → Uso de agua para los procesos en los que se requiere para crear vapor de agua, refrigeración y otros usos.

El agua es un recurso imprescindible para el consumo, para la seguridad alimenticia y para la supervivencia de los ecosistemas. La disminución de los recursos hídricos podría tener una consecuencia directa en la calidad del agua, concretamente uno de los peligros más probables es la contaminación con agua de mar debido a la posible mezcla de ambos tipos de agua al requerir extraer agua de zonas más profundas. La tecnología nucleoelectrica toma agua para la refrigeración que posteriormente es devuelta al medio.

- **Punto crítico 3** → Descargas de contaminantes en cuerpos de agua incluyendo la contaminación térmica

Una de las principales consecuencias de la contaminación del agua es la pérdida de la biodiversidad de dicho medio. Por otro lado, puede tener consecuencias directas en la salud humana al poder llegar a consumir agua contaminada.

Sí que puede llegar a existir una contribución a la alteración de la calidad el agua, expresado en la categoría de impacto de ecotoxicidad del agua, tanto dulce como marina. Esto se debe a los efluentes tanto líquidos como gaseosos que, a pesar de emitirse de forma controlada, se producen pudiendo llegar a alterar ciertas variables del medio.

- **Punto crítico 4** → Generación de residuos sólidos incluidos residuos peligrosos

Las consecuencias de la generación de residuos acarrearán una serie de problemáticas asociadas, no solo medioambientales sino también sociales, económicas y sanitarias. Tomando como referencia las problemáticas ambientales se puede destacar el consumo de recursos, ocupación del espacio, deterioro del paisaje, contaminación de suelo, agua y aire, mayor riesgo de incendios entre otras.

La problemática relacionada con los residuos reside en la generación de residuos peligrosos debido al componente radiactivo de los mismos. Sin embargo, dada la peligrosidad de los

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

residuos sólidos que genera este tipo de tecnología la gestión de los mismos es un aspecto altamente controlado, tanto que no supone una incidencia al medio.

- **Punto crítico 5** → Uso del suelo para la producción de combustible, generación de energía y líneas de distribución de la electricidad generada.

La ganancia de terreno en favor de industria y en detrimento de paisaje natural conlleva asociados numerosos impactos negativos al medioambiente. La pérdida de bosque elimina valiosos sumideros de CO<sub>2</sub> los cuales contribuyen a la disminución de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

El uso del suelo es un impacto intrínseco a cualquier actividad de carácter no natural, esto quiere decir que cualquier tecnología de generación eléctrica va a tener un factor de uso del suelo propio. Tras analizar los ACV de las tecnologías de generación nucleoelectrónica el uso del suelo no se trata de un factor crítico entre el resto.

Las categorías de impacto que resultan más penalizadas de los resultados de los ACV de las tecnologías de generación nucleoelectrónica son las siguientes:

- **Disminución de recursos minerales:** corresponde mayoritariamente con la acción de la extracción del uranio. Es necesario puntualizar que en un escenario realista la extracción minera se daría en aquellos lugares donde existiese tal recurso, por lo que la elección de este emplazamiento no ofrece un elevado margen de maniobra.
- **Radiación:** Durante la etapa de la operación normal la influencia de la radiación en el medio y las personas es muy baja gracias a las estrictas regulaciones en protección radiológica de cada país, así como a la evolución y los avances de la industria nuclear encaminados a minimizar el riesgo radiológico en todos los sistemas y componentes de la planta. No obstante, existen cantidades de radionucleidos que, aunque se emiten de forma controlada, son liberados al medioambiente. Poniendo en perspectiva la acción de estos radionucleidos sobre el entorno:
  - Dosis anual recibida por vivir a 9 km de una central nuclear → 0.0055 mSv.
  - Vuelo de Madrid a Santiago de Chile → 0.04-0.07 mSv
  - Fumar un paquete de tabaco al día → 0.36 mSv.
  - Una prueba de diagnóstico como una mamografía equivale a → 0.42 mSv.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- Exposición media de fondo en un año → 2.4 mSv
- **Ecotoxicidad del agua:** La prevención y las medidas legislativas son herramientas que pueden hacer que esta categoría de impacto pueda verse más restringida. Sin embargo, como en cualquier otra industria, la operación normal de la central lleva consigo de forma inherente la emisión de vertidos residuales a los medios hídricos. En este caso, la incidencia en el territorio chileno dependerá de las condiciones concretas donde se produzca, si bien es cierto que las calidades de las aguas decrecen de sur a norte, por lo que una primera aproximación podría considerar los medios hídricos del centro y norte.

En cuanto a las medidas técnicas, administrativas y legales identificadas, las medidas para mitigar la disminución de recursos son, principalmente, de carácter técnico y afectan de manera determinante al ciclo de combustible. Por otro lado, la ecotoxicidad del agua se regula mediante la implantación de BAT que controlan y limitan la emisión de productos potencialmente contaminantes al medio acuático. La solución que implanta la industria nuclear desde la legislación de cada país o las recomendaciones emitidas por organismos internacionales sobre el impacto de la radiación sobre las personas y el medioambiente consiste en establecer una serie de límites legales que aplican a todas las fases de la vida de la central nuclear y el ciclo de combustible. El establecimiento de estos límites proviene de normativas internacionales que adoptan de manera común los distintos países. Estas medidas están alineadas con los objetivos de la Protección Radiológica de manera que el fin de todas ellas sea garantizar la protección de las personas y el medioambiente frente a los efectos no deseados de las radiaciones ionizantes.

Los resultados obtenidos del ACV de la generación de energía nucleoelectrica se contextualizan en el momento en que se comparan con los resultados para otras tecnologías de generación eléctrica. Se ha elaborado la comparativa frente a los resultados de ACV tanto de tecnologías de origen fósil como renovable. Las tecnologías escogidas han sido: térmica de ciclo combinado a gas natural, térmica de ciclo combinado a gas natural con captura de CO<sub>2</sub>, térmica convencional a carbón, eólica, hidroeléctrica y solar fotovoltaica.

Tras el análisis comparativo de las categorías de impacto evaluadas para cada tecnología destaca que la tecnología de generación nucleoelectrica solo destaca por encima de las demás en la categoría de radiación y en la de disminución de recursos minerales. Una de las más penalizadas es la térmica convencional a carbón sobre todo en aquellas categorías que inciden sobre la contaminación atmosférica (potencial de calentamiento global, formación fotoquímica de ozono...).

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

Como conclusión, cabe destacar que la tecnología de generación nucleoelectrónica se presenta como una alternativa con baja contribución al aumento de gases de efecto invernadero además de otras problemáticas de contaminación atmosférica como la formación fotoquímica de ozono o de gases acidificantes de los suelos. Si bien es cierto que las alternativas de carácter renovable presentan un mejor desempeño ambiental a nivel general que cualquiera del resto de tecnologías la eficiencia energética es su punto crítico, aspecto que se ve reflejado en el uso del suelo. La demanda de terreno para la instalación de centrales de carácter renovable es mayor por kWh que para las tecnologías térmicas o nucleoelectrónicas.

Teniendo en cuenta los resultados generados de los tres informes como respuesta a la Identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile es posible destacar tres tecnologías de generación eléctrica en términos ambientales frente a las demás estudiadas. La **energía eólica** supone una fuente de generación eléctrica que, como se ha observado en las comparaciones realizadas con otras tecnologías, ofrece resultados menos penalizantes frente a las categorías de impacto. Si bien es cierto que las energías que parten de recursos renovables son menos eficientes por área ocupada que las que emplean combustibles de origen fósil, la tecnología eólica permite el uso del suelo de forma simultánea para otras actividades convirtiendo un punto crítico en una ventaja ambiental. Por otro lado, destaca la **tecnología fotovoltaica** que, en comparación con las demás tecnologías estudiadas, presenta menores niveles de impacto al medio y a la salud de las personas. A pesar de que la producción de los paneles solares conlleva el uso de ciertos materiales peligrosos, la elección de paneles convencionales que no emplean cadmio puede hacer que esta etapa sea algo menos perjudicial. El uso del suelo en esta tecnología es un factor determinante, sin embargo, actualmente se están emplazando los parques solares en terrenos baldíos o en tejados de edificios existentes lo cual evitaría este factor crítico. Por último, las **tecnologías de generación nucleoelectrónica** ofrecen otra alternativa con bajas contribuciones a las principales problemáticas ambientales. El hecho de no depender de un combustible fósil para la generación de electricidad evita numerosos impactos al medio entre los que se encuentra el cambio climático, lo que hace que la tecnología nucleoelectrónica sea una opción para cumplir con la demanda energética mundial y los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero en la lucha frente al calentamiento global.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ISO 14040 - *Análisis de Ciclo de Vida - Principios y marco de referencia*, 2006.
- [2] ISO 14044 - *Análisis del Ciclo de Vida - Requisitos y directrices*, 2006.
- [3] Banco Mundial, «Energía - Panorama General,» Abril 2018. [En línea]. Available: <http://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>.
- [4] Deloitte, «Sector Energía I: Marco Regulatorio y matriz energética,» Chile, 2016.
- [5] Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA), «Sector Eléctrico - Funcionamiento de las centrales eléctricas,» [En línea]. Available: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1346-central-gasificacion>.
- [6] ENDESA, «Endesa Educa - Centrales térmicas convencionales,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/viii.-las-centrales-termicas-convencionales](https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/viii.-las-centrales-termicas-convencionales).
- [7] National Energy Foundation, «Types of Photovoltaic (PV) Cells,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.nef.org.uk/knowledge-hub/solar-energy/types-of-photovoltaic-pv-cells>.
- [8] M. K. Chandel, L. F. Pratson y R. B. Jackson, «The potencial impacts of climate-change policy on freshwater use in thermoelectric power generation,» *Energy Policy*, nº 39, pp. 6234-6242, 2011.
- [9] Ministerio para la transición ecológica - Secretaría de Estado de Energía, «El Gas Natural,» [En línea]. Available: <http://www.mincotur.gob.es/ENERGIA/GAS/GAS/Paginas/gasnatural.aspx>.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- [10] IBERDROLA, «Declaración Ambiental C.C. Castejón,» Madrid, 2016.
- [11] MAPAMA, «Sistema Español de Inventario de Emisiones - Metodologías de estimación de emisiones,» España, 2017.
- [12] Union of Concerned Scientists, «Science for a Healthy and Safer World - How hydroelectric energy works,» [En línea]. Available: [https://www.ucsusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-hydroelectric-energy.html#.W2FtWtlzaUk](https://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-hydroelectric-energy.html#.W2FtWtlzaUk).
- [13] Energías Renovables, «Impacto medioambiental de la energía solar,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/impacto-medioambiental-energia-solar/>.
- [14] U.S. Energy Information Administration, «Wind Explained: Wind Energy and the Environment,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: [https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=wind\\_environment](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=wind_environment).
- [15] Union of Concerned Scientists, «Environmental Impacts of Wind Power,» Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.ucsusa.org/clean-energy/renewable-energy/environmental-impacts-wind-power#.WzSlpNlzaUk>. [Último acceso: Junio 2018].
- [16] Union of Concerned Scientists, «Science for a Healthy Planet and Safer World - How coal works,» [En línea]. Available: <https://www.ucsusa.org/clean-energy/all-about-coal/how-coal-works#.W2F089lzaUk>.
- [17] Union of Concerned Scientists, «Environmental Impacts of Hydroelectric Power,» [En línea]. Available: [https://www.ucsusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/renewable-energy/environmental-impacts-hydroelectric-power.html#.Wyy2d6czaUk](https://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/environmental-impacts-hydroelectric-power.html#.Wyy2d6czaUk).

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- [18] Union of Concerned Scientists, «Science for a Healthy Planet and Safer World - How solar panels work,» [En línea]. Available: <https://www.ucsusa.org/clean-energy/renewable-energy/how-solar-panels-work#.W2FzatlzaUI>.
- [19] V. Fthenakis y H. Kim, «Photovoltaics: Life-cycle analyses,» *Solar Energy*, n° 85, pp. 1609-1628, 2010.
- [20] Organización Mundial de la Salud, OMS, «Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas - Cadmio,» [En línea]. Available: [http://www.who.int/ipcs/assessment/public\\_health/cadmium/es/](http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/cadmium/es/).
- [21] Travis S.Carless, W. Michael Griffin, Paul S. Fischbeck, «The environmental competitiveness of small modular reactors: A life cycle study,» n° 114, 2016.
- [22] Giorgio Gnugnoli, Michele Laraia, Peter Stegnar, «Minería y tratamiento del uranio: Evaluación de las cuestiones relativas a la restauración del medio ambiente».
- [23] Ministerio de Medio Ambiente de Chile, «Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente en Chile,» 2016.
- [24] Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), «Suelos, Desertificación,» [En línea]. Available: <http://ide.mma.gob.cl/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [25] Sistema Nacional de Información Ambiental, «Suelos, Erosividad,» [En línea]. Available: <http://ide.mma.gob.cl/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [26] Banco mundial, «Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos,» Chile, 2011.
- [27] Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, «Atlas del Agua, Chile 2016,» Chile, 2016.

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- [28] MAPAMA, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, «Plan Nacional de calidad del aire y protección de la atmósfera 2013-2016,» España, 2013.
- [29] Universidad de Chile, Instituto de Asuntos Públicos , «Estado del Medio Ambiente en Chile - Comparación 1999 - 2015,» 2016.
- [30] Ministerio del Medio Ambiente - Gobierno de Chile, «Informe del Estado del Medio Ambiente,» 2016. [En línea].
- [31] Ministerio del Medio Ambiente, «Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Chile,» Chile, 2014.
- [32] Instituto Nacional de Estadísticas, «Estadísticas Vitales - Anuario 2015,» Chile, 2015.
- [33] Instituto Nacional de Estadísticas (INE) Chile, «Estadísticas agropecuarias, censo agropecuario y forestal,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.ine.cl/estadisticas/economicas/estad%C3%ADsticas-agropecuarias>.
- [34] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA, «Panorama de la Agricultura Chilena,» Chile.
- [35] Nuclear Regulatory Commission, «<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/doses-daily-lives.html>,» [En línea].
- [36] The U.S. Department of Energy- Office of Environment, Health, Safety & Security, «[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/Radiation\\_in\\_Perspective.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/Radiation_in_Perspective.pdf),» [En línea].
- [37] Foro Nuclear, «<https://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119909-que-sabes-de-la-radiacion>,» [En línea].

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

- [38] Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA), «Riesgos para la salud humana, zona saturada latente,» [En línea]. Available: <http://ide.mma.gob.cl/#>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [39] NASA, «Nasa Ozone Watch,» 8 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>.
- [40] S.F. Ashley, R.A. Fenner, W.J. Nuttall, G.T. Parks, «Life-cycle impacts from novel thorium-uranium-fuelled nuclear energy,» vol. 101, 2015.
- [41] Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), «Estudio del impacto radiológico de las centrales térmicas de carbón sobre sus entornos,» Colección Informes Técnicos 34.2012.



*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

# **ANEXO 1**

**Categorías de impacto midpoint sin  
normalizar para cada tecnología y  
para cada etapa del ciclo del  
combustible**

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

*Hoja en blanco intencionadamente*

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

	Unidad	SMR CA	PWR CA	PWR CC	HWR CA	SMR CC
<i>Cambio climático</i>	g CO <sub>2</sub> eq	40,09	34,04	27,42	77,13	28,61
<i>Destrucción de la capa de ozono</i>	g CFC-11 eq	2,6E-06	2,2E-06	2,1E-05	4,5E-06	1,8E-06
<i>Acidificación terrestre</i>	g SO <sub>2</sub> eq	0,54	0,44	0,35	0,54	0,40
<i>Eutrofización del agua</i>	g P eq	7,4E-04	9,3E-04	8,2E-04	2,5E-03	4,4E-04
<i>Eutrofización marina</i>	g N eq	0,10	0,08	0,06	0,06	0,07
<i>Toxicidad humana</i>	g 1,4-DB eq	100,34	80,62	61,14	58,71	75,02
<i>Formación de fotoquímica de ozono</i>	g NMVOC	0,82	0,66	0,51	0,60	0,61
<i>Formación de partículas</i>	g PM <sub>10</sub> eq	0,26	0,22	0,17	0,38	0,18
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	g 1,4-DB eq	1,7E-03	2,3E-03	1,8E-03	1,3E-02	8,0E-04
<i>Ecotoxicidad del agua</i>	g 1,4-DB eq	1,568	1,253	0,949	0,928	1,174
<i>Ecotoxicidad marina</i>	g 1,4-DB eq	1,565	1,256	0,951	0,928	1,171
<i>Radiación</i>	Bq <sup>235</sup> U eq	1.501,90	1.264,19	634,07	1.159,98	562,24
<i>Ocupación de terreno agrícola</i>	m <sup>2</sup> a	2,6E-04	3,9E-04	3,3E-04	2,2E-03	1,3E-04
<i>Ocupación de terreno urbano</i>	m <sup>2</sup> a	4,4E-03	3,6E-03	2,7E-03	2,7E-03	3,3E-03
<i>Transformación de suelo natural</i>	m <sup>2</sup>	1,1E-05	8,5E-06	6,5E-06	1,9E-05	7,5E-06
<i>Disminución de recursos hídricos</i>	m <sup>3</sup>	3,7E-02	5,0E-02	5,1E-02	2,1E-01	1,9E-02
<i>Disminución de recursos minerales</i>	g Fe eq	269,42	215,82	163,20	152,31	201,84
<i>Disminución de recursos fósiles</i>	g oil eq	12,65	10,59	8,43	23,97	9,12

LWR CA		Minería y fabricación de concentrados	de Conversión	Fabricación de combustible	Operación de la planta	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
<i>Cambio climático</i>	g CO <sub>2</sub> eq	29,77	2,01	0,36	3,37E-05	5,39E-12	1,54E-13
<i>Destrucción de la capa de ozono</i>	g CFC-11 eq	1,82E-06	2,22E-07	2,55E-08	8,27E-07	2,61E-19	6,35E-21
<i>Acidificación terrestre</i>	g SO <sub>2</sub> eq	0,42	0,01	2,471E-03	3,56E-05	3,31E-14	8,39E-16
<i>Eutrofización del agua</i>	g P eq	5,52E-04	7,93E-05	2,97E-05	3,59E-05	8,73E-16	3,20E-17
<i>Eutrofización marina</i>	g N eq	7,97E-02	2,80E-04	2,33E-04	6,03E-06	1,39E-15	2,74E-17
<i>Toxicidad humana</i>	g 1,4-DB eq	80,02	0,10	0,11	4,91E-05	1,29E-12	5,79E-14
<i>Formación de fotoquímica de ozono</i>	g NMVOC	0,64	0,01	2,41E-03	2,24E-05	2,64E-14	6,52E-16
<i>Formación de partículas</i>	g PM <sub>10</sub> eq	0,20	0,01	2,57E-03	4,23E-05	4,88E-14	7,10E-16
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	g 1,4-DB eq	1,01E-03	3,32E-04	1,24E-04	2,36E-06	2,62E-15	3,50E-17
<i>Ecotoxicidad del agua</i>	g 1,4-DB eq	1,25	1,89E-03	1,23E-03	3,79E-05	2,48E-15	5,97E-17
<i>Ecotoxicidad marina</i>	g 1,4-DB eq	1,25	2,30E-03	1,46E-03	9,42E-05	1,49E-14	6,13E-16
<i>Radiación</i>	Bq <sup>235</sup> U eq	1144,84	36,25	4,94	5,93E-02	9,52E-14	2,82E-15
<i>Ocupación de terreno agrícola</i>	m <sup>2</sup> a	0,18	0,04	0,01	1,82E-06	4,43E-13	1,66E-14
<i>Ocupación de terreno urbano</i>	m <sup>2</sup> a	3,48	0,01	0,01	2,75E-06	1,32E-13	5,48E-15
<i>Transformación de suelo natural</i>	m <sup>2</sup>	8,58E-03	5,31E-04	8,23E-05	2,74E-06	2,50E-16	-9,45E-18
<i>Disminución de recursos hídricos</i>	m <sup>3</sup>	18,78	8,91	2,48	0,00E+00	4,63E-11	6,44E-13
<i>Disminución de recursos minerales</i>	g Fe eq	215,03	0,08	0,18	4,32E-05	2,13E-12	7,01E-14
<i>Disminución de recursos fósiles</i>	g oil eq	9,32	0,64	0,10	5,65E-05	1,37E-12	2,95E-14

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

LWR CC		Minería fabricación concentrados	y de Conversión de combustible	Fabricación de de combustible	Operación de la planta <sup>4</sup>	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático	g CO <sub>2</sub> eq	22,40	1,48	2,33	-8,79E-01	5,39E-12	1,36E-13
Destrucción de la capa de ozono	g CFC-11 eq	1,37E-06	1,63E-07	0,00	-6,47E-08	2,61E-19	5,56E-21
Acidificación terrestre	g SO <sub>2</sub> eq	0,32	0,01	0,01	-4,75E-03	3,31E-14	7,37E-16
Eutrofización del agua	g P eq	4,16E-04	5,84E-05	1,27E-04	-1,02E-04	8,73E-16	2,83E-17
Eutrofización marina	g N eq	6,00E-02	2,06E-04	1,00E-03	-1,60E-03	1,39E-15	2,41E-17
Toxicidad humana	g 1,4-DB eq	60,21	0,08	0,50	-1,41E-01	1,29E-12	5,12E-14
Formación de fotoquímica de ozono	g NMVOC	0,48	4,81E-03	1,05E-02	-2,91E-03	2,64E-14	5,70E-16
Formación de partículas	g PM <sub>10</sub> eq	0,15	4,15E-03	6,03E-03	-5,66E-03	4,88E-14	6,27E-16
Ecotoxicidad terrestre	g 1,4-DB eq	7,57E-04	2,44E-04	2,19E-04	-3,48E-04	2,62E-15	3,11E-17
Ecotoxicidad del agua	g 1,4-DB eq	9,40E-01	1,39E-03	7,18E-03	-4,06E-04	2,48E-15	5,23E-17
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DB eq	0,94	0,00	6,63E-03	-1,74E-03	1,49E-14	5,42E-16
Radiación	Bq <sup>235</sup> U eq	861,35	26,68	13,61	-2,69E+02	9,52E-14	2,45E-15
Ocupación de terreno agrícola	m <sup>2</sup> a	0,13	0,03	0,05	-5,35E-02	4,43E-13	1,47E-14
Ocupación de terreno urbano	m <sup>2</sup> a	2,62	7,18E-03	0,04	-1,16E-02	1,32E-13	4,81E-15
Transformación de suelo natural	m <sup>2</sup>	6,46E-03	3,90E-04	3,66E-04	-2,69E-04	2,50E-16	-7,57E-18
Disminución de recursos hídricos	m <sup>3</sup>	14,13	6,56	14,82	-1,59E+00	4,63E-11	5,69E-13
Disminución de recursos minerales	g Fe eq	161,78	0,06	0,75	-1,78E-01	2,13E-12	6,11E-14
Disminución de recursos fósiles	g oil eq	7,01	0,47	0,59	-2,01E-01	1,37E-12	2,58E-14

<sup>4</sup> Estos valores son negativos porque en esta etapa se contabiliza el reprocesado del combustible y el programa SimaPro considera que reprocesar el combustible contribuye de manera positiva, "recompensando" el cómputo global

HWR CA		Minería fabricación concentrados	y de fabricación de combustible	y de Construcción de la planta	Operación de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático		20,90	1,15E-02	3,84	5,22E+01	1,37E-01
Destrucción de la capa de ozono		1,28E-06	3,37E-10	1,18E-07	3,06E-06	5,59E-09
Acidificación terrestre		0,30	6,84E-05	2,165E-02	2,17E-01	7,41E-04
Eutrofización del agua		3,88E-04	1,03E-06	3,77E-04	1,73E-03	2,83E-05
Eutrofización marina		5,60E-02	3,44E-06	9,86E-04	5,82E-03	2,42E-05
Toxicidad humana		56,19	3,33E-04	0,34	2,12E+00	5,13E-02
Formación de fotoquímica de ozono		0,45	5,27E-05	1,71E-02	1,30E-01	5,74E-04
Formación de partículas		0,14	1,50E-04	3,87E-02	2,06E-01	6,28E-04
Ecotoxicidad terrestre		7,06E-04	8,14E-06	2,06E-03	1,07E-02	3,11E-05
Ecotoxicidad del agua		0,88	4,98E-06	1,51E-03	4,92E-02	5,26E-05
Ecotoxicidad marina		0,88	6,43E-06	4,55E-03	4,65E-02	5,43E-04
Radiación		803,90	1,05E-04	0,05	3,56E+02	2,47E-03
Ocupación de terreno agrícola		0,12	5,23E-04	0,14	1,91E+00	1,48E-02
Ocupación de terreno urbano		2,44	8,32E-05	0,03	2,02E-01	4,85E-03
Transformación de suelo natural		6,03E-03	1,96E-06	7,53E-04	1,28E-02	-7,95E-06
Disminución de recursos hídricos		13,19	0,13	34,43	1,64E+02	5,70E-01
Disminución de recursos minerales		150,99	9,66E-05	0,70	5,59E-01	6,16E-02
Disminución de recursos fósiles		6,54	3,19E-03	0,95	1,64E+01	2,60E-02

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final

SMR CA		Minería y fabricación de concentrados	Conversión	Fabricación de combustible	Operación de la planta	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático	g CO <sub>2</sub> eq	37,28	2,50	0,40	3,91E+00	3,78E-01	2,49E-02
Destrucción de la capa de ozono	g CFC-11 eq	2,28E-06	2,75E-07	2,90E-08	2,95E-01	2,38E-08	9,64E-10
Acidificación terrestre	g SO <sub>2</sub> eq	0,53	0,01	2,812E-03	1,16E-02	1,71E-03	1,22E-04
Eutrofización del agua	g P eq	6,92E-04	9,85E-05	3,38E-05	3,65E-03	2,44E-05	2,80E-06
Eutrofización marina	g N eq	9,99E-02	3,48E-04	2,66E-04	9,60E-04	5,49E-05	4,10E-06
Toxicidad humana	g 1,4-DB eq	100,22	0,13	0,13	8,01E-04	5,64E-02	5,36E-03
Formación de fotoquímica de ozono	g NMVOC	0,81	0,01	2,74E-03	4,94E-04	1,64E-03	1,19E-04
Formación de partículas	g PM <sub>10</sub> eq	0,25	0,01	2,93E-03	1,07E-04	9,05E-04	8,91E-05
Ecotoxicidad terrestre	g 1,4-DB eq	1,26E-03	4,12E-04	1,41E-04	6,81E-05	2,38E-05	3,13E-06
Ecotoxicidad del agua	g 1,4-DB eq	1,56	2,34E-03	1,40E-03	6,38E-05	1,69E-04	8,75E-06
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DB eq	1,56	2,85E-03	1,66E-03	2,98E-05	5,28E-04	5,59E-05
Radiación	Bq <sup>235</sup> U eq	1433,84	44,99	5,62	1,16E-05	1,64E-02	5,80E-04
Ocupación de terreno agrícola	m <sup>2</sup> a	0,22	0,05	0,01	8,18E-06	1,22E-02	1,31E-03
Ocupación de terreno urbano	m <sup>2</sup> a	4,35	0,01	0,01	2,22E-06	5,50E-03	2,45E-03
Transformación de suelo natural	m <sup>2</sup>	1,07E-02	6,58E-04	9,37E-05	1,65E-06	9,46E-05	-1,20E-05
Disminución de recursos hídricos	m <sup>3</sup>	23,52	11,06	2,82	7,02E-07	1,30E+00	7,44E-02
Disminución de recursos minerales	g Fe eq	269,31	0,10	0,20	5,21E-07	1,75E-01	1,06E-02
Disminución de recursos fósiles	g oil eq	11,67	0,80	0,11	1,56E-09	1,18E-01	5,01E-03

SMR CC		Minería y fabricación de concentrados	Conversión	Fabricación de combustible	Operación de la planta	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático	g CO <sub>2</sub> eq	27,95	1,87	0,22	-2,00E+00	3,78E-01	1,04E-01
Destrucción de la capa de ozono	g CFC-11 eq	1,71E-06	2,06E-07	0,00	-1,59E-07	2,38E-08	4,22E-09
Acidificación terrestre	g SO <sub>2</sub> eq	0,40	0,01	0,00	-1,10E-02	1,71E-03	5,60E-04
Eutrofización del agua	g P eq	5,19E-04	7,39E-05	2,08E-05	-2,25E-04	2,44E-05	2,15E-05
Eutrofización marina	g N eq	7,49E-02	2,61E-04	1,08E-04	-2,71E-03	5,49E-05	1,83E-05
Toxicidad humana	g 1,4-DB eq	75,14	0,10	0,02	-3,33E-01	5,64E-02	3,89E-02
Formación de fotoquímica de ozono	g NMVOC	0,61	6,09E-03	1,04E-03	-7,45E-03	1,64E-03	4,33E-04
Formación de partículas	g PM <sub>10</sub> eq	0,19	5,26E-03	2,19E-03	-1,09E-02	9,05E-04	4,76E-04
Ecotoxicidad terrestre	g 1,4-DB eq	9,45E-04	3,09E-04	1,21E-04	-6,25E-04	2,38E-05	2,36E-05
Ecotoxicidad del agua	g 1,4-DB eq	1,17E+00	1,76E-03	1,09E-04	-1,00E-03	1,69E-04	3,98E-05
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DB eq	1,17	0,00	2,24E-04	-4,04E-03	5,28E-04	4,12E-04
Radiación	Bq <sup>235</sup> U eq	1075,03	33,76	2,92	-5,50E+02	1,64E-02	1,86E-03
Ocupación de terreno agrícola	m <sup>2</sup> a	0,17	0,04	0,01	-1,24E-01	1,22E-02	1,12E-02
Ocupación de terreno urbano	m <sup>2</sup> a	3,26	9,08E-03	0,00	-2,56E-02	5,50E-03	3,66E-03
Transformación de suelo natural	m <sup>2</sup>	8,06E-03	4,94E-04	3,63E-05	-5,03E-04	9,46E-05	-5,75E-06
Disminución de recursos hídricos	m <sup>3</sup>	17,63	8,30	2,58	-1,18E+01	1,30E+00	4,33E-01
Disminución de recursos minerales	g Fe eq	201,92	0,07	0,03	-4,04E-01	1,75E-01	4,64E-02
Disminución de recursos fósiles	g oil eq	8,75	0,60	0,06	-4,77E-01	1,18E-01	1,96E-02

<sup>5</sup> Estos valores son negativos porque en esta etapa se contabiliza el reprocesado del combustible y el programa SimaPro considera que reprocesar el combustible contribuye de manera positiva, "recompensando" el cómputo global

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

*Hoja en blanco intencionadamente*

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

# **ANEXO 2**

## **Datos por unidad funcional**

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

*Hoja en blanco intencionadamente*

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

	PWR <sup>7</sup>		SMR <sup>8</sup>		HWR <sup>9</sup>
	CA	CC	CA	CC	CA
	<i>g/kWh</i>				
<b><i>Minería y fabricación de concentrados</i></b>	1,65	1,23	2,05	1,54	1,15
<b><i>Conversión</i></b>	0,0395	0,0296	0,0489	0,0367	0,0276
<b><i>Enriquecimiento</i></b>	0,0038	0,0029	0,0044	0,0033	0,0027
<b><i>Fabricación de combustible</i></b>	0,0029	0,0022	0,0033	0,0025	0,0020

<sup>7</sup> La referencia para los datos de PWR es la [21]

<sup>8</sup> La referencia para los datos de SMR es la [21]

<sup>9</sup> La referencia para los datos de HWR es la [36]

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---

*Hoja en blanco intencionadamente*



**IDOM**

*Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe Final*

---