



Universidad de Chile

Facultad de Economía y Negocios

Escuela de Economía y Administración

Estudio exploratorio para la localización de una central nucleoelectrica en Chile

Seminario de Título Ingeniería Comercial, Mención Administración de Empresas

Autores:

Sebastián Ignacio Lara Toloza
Alejandro Esteban Linares Flores
María Alejandra Vázquez Ahumada
Claudia Alejandra Villena Rojas

Profesor Guía:

Reinaldo Sapag Chain

SANTIAGO, CHILE

Diciembre 2008

Agradecimientos

A mi polola Nathaly, por su amor y apoyo incondicional, su cariño y confianza en mí, sus opiniones y siempre útiles consejos.

A su familia por abrirme las puertas de su hogar y de sus corazones.

A mi familia por su apoyo y por ayudarme a ser quién soy.

A mis amigos que han estado a mi lado durante años y que ya son parte de mi vida.

Y especialmente a mis admirados y queridos compañeros Alejandra, Claudia y Alejandro, por creer en mí a pesar de todo, por su paciencia y excelentísimo trabajo.

Sebastián

A mi papá, mamá y hermanos por haberme apoyado durante más años que los que merecía.

A mis abuelos y abuelas, tías y tíos, primos y primas por influir positivamente en mi vida.

A mi querida Alejandrita por su dulce presión para lograr que hiciera todo lo que tuve que hacer.

A Felipe que en un momento confuso me dio una señal concreta del camino a seguir.

A Pancho, Miguel, Cristian, Christian, Lorena, Sergio, Mauricio, M^{ra} Cristina, Claudio, Claudio, Felipe, y todos los amigos que no nombro pero que confiaron en que lo lograría y me acompañaron en algún momento de mi vida.

A Matilda, los Tigres, Talcahuen y el GGS Alí-Quilen que construyeron la persona que soy.

A Claudia y Sebastian por acompañarnos en esta aventura.

Alejandro

Agradecimientos

A mi fallecido padre, que me dio el mejor ejemplo que puedo seguir y por inspirarme cada día a trabajar duro para lograr lo que deseo y sobre todo por haber sido el mejor padre que pude tener.

A mi madre querida, que acepto que no estuviera fines de semana completos por trabajar en mi tesis y porque siempre me ha dado las herramientas para que me forme como una buena persona y sobre todo porque siempre me ha aceptado como soy.

A mis lindos hermanos y toda mi familia que cada día ponen un granito de arena para que yo me supere.

A mis compañeros de seminario que me aguantaron todo este tiempo, sobre todo a Alejandro por soportarme y ayudarme ahora y todo momento en ser una mejor persona, en superarme y por decirme cada día que soy una persona valiosa y sobre todo por entregarme su infinito amor.

A mis suegros por aceptarme los fines de semanas en su casa y así permitir que trabajáramos en esto.

Alejandra

A mi amado pololo Fabián, que sin su infinito apoyo en todos los aspectos que rodean esta tesis y mi vida nada de esto hubiera sido posible.

A mi adorada familia, por su constante y eterno amor, preocupación, ánimo y paciencia.

A mis compañeros de tesis, con quienes después de muchas horas de trabajo y esfuerzo logramos llevar a cabo exitosamente nuestra misión.

Y a todos aquellos que, además de las personas recién nombradas, aguantaron con cariño y comprensión las consecuencias de mi poco tiempo: las personas de mi trabajo, el profesor Eduardo Kohler de quién soy ayudante y mis amigos de la compañía C-Danza.

Claudia .

Agradecimientos

A Fabián Rojas, quién sólo por aspectos técnicos no es uno de los autores de esta tesis, por toda la ayuda y apoyo brindados desde el inicio de nuestra tesis hasta su entrega.

Al Señor Gonzalo Torres, jefe del departamento de Materiales Nucleares de la Comisión Nacional de Energía Nuclear, por su disposición, tiempo y recomendaciones claves que nos ayudaron a llegar a buen puerto.

A nuestro querido profesor, Reinaldo Sapag, por la inmensa confianza depositada en nosotros, su cálida guía y el constante ánimo brindado, sobretodo en aquellos momentos en que el objetivo parecía lejano.

Alejandra, Claudia, Alejandro y Sebastián.

Resumen

La capacidad energética chilena, principalmente basada en plantas hidráulicas y térmicas, enfrenta un escenario futuro en que tendrá que satisfacer una creciente demanda que según proyecciones de la CNE podría más que triplicarse para el año 2030, además de estabilizar al sistema ante eventos como períodos con escasez de precipitaciones o la volatilidad permanente que muestra el precio de los combustibles fósiles. Por esto, la energía nuclear surge como una opción que debe ser evaluada para la diversificación de nuestra matriz.

Al inicio de la investigación el objetivo de nuestro seminario de título era determinar un lugar óptimo real para la ubicación de una central nuclear en Chile, pero con el avance del estudio y según la opinión de expertos, concluimos que es imposible determinarla dada la necesidad de primero generar la información y realizar estudios específicos en el país. En este contexto, nuestro objetivo se transformo en realizar un catastro de la información existente en conjunto con el organismo que la maneja para luego, determinar cuál es la información que debe ser generada.

En la primera parte de la investigación, se recopiló información de carácter general respecto al mercado nucleoelectrico mundial y tópicos claves al momento de considerar esa tecnología de generación. También se describe la situación actual y proyectada del mercado eléctrico chileno para contextualizar y justificar la realización del estudio. En la segunda, se describen la información y recursos necesarios para evaluar la localización de una planta nuclear, para esto nos basamos principalmente los parámetros de seguridad del Site Evaluation For Nuclear Installations Safety Requirements de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), además se agregaron otros parámetros, no relacionados con la seguridad de la instalación, que según expertos deben ser considerados. En base a la información y estudios requeridos, se determinó, cuales son los organismos en Chile que se encargan de generarla, la información con la que cuentan actualmente y aquella que falta por generar.

Según el análisis realizado, se concluye que no es posible determinar un lugar concreto dado que no existe toda la información necesaria para evaluar la localización de una central según los estándares requeridos por los organismos mundiales. Es necesario generar la

información faltante antes de poder evaluar adecuadamente los parámetros de seguridad, técnicos, económicos, ambientales y sociales que involucra la decisión, para así llegar a una conclusión más acabada y confiable sobre el particular. Y para esto será de suma relevancia el rol de los distintos organismos a cargo de realizar los estudios necesarios para garantizar la seguridad y la óptima ubicación para una central nuclear en Chile.

Índice general

Introducción	1
1. Antecedentes Generales	2
1.1. Mercado Mundial	2
1.2. Por qué estudiar la opción nucleoelectrica	6
1.3. Otros aspectos importantes a considerar	17
1.3.1. Reactores Nucleares	17
1.3.2. Mercado del Uranio	21
1.3.3. Manejo de desechos radiactivos	24
1.4. Opiniones de Expertos, Personajes Públicos y del Empresariado	26
2. Evaluación de la Localización: Información y Recursos Necesarios	30
2.1. Aspectos sobre la seguridad	30
2.1.1. Requisitos específicos para la evaluación	32
2.1.1.1. Los terremotos y fallas superficiales	32
2.1.1.2. Los fenómenos meteorológicos	41
2.1.1.3. Inundaciones	51
2.1.1.4. Riesgos geotécnicos	59
2.1.1.5. Acontecimientos externos inducidos por el hombre	67
2.1.1.6. Otras consideraciones importantes	73
2.1.2. Características del sitio y los posibles efectos	74
2.1.2.1. Dispersión de material radiactivo a través de la atmósfera y de las aguas superficiales y subterráneas	74
2.1.2.2. La distribución de la población	81
2.1.2.3. Utilización de la tierra y el agua en la región	83
2.1.2.4. La radiactividad ambiente	86
2.2. Aspectos no relacionados con la seguridad	86
2.2.1. Transmisión eléctrica	87

2.2.2. Vías de transporte	88
2.2.3. Recursos humanos	89
2.2.4. Aspectos legales y uso del suelo	90
2.2.5. Acceso a fuente de enfriamiento	92
2.2.6. Impactos ambientales	93
Conclusiones	95
Bibliografía	97
Anexos	105

Índice de figuras

1.1. Plantas Nucleares Operativas y en Construcción por país	3
1.2. Producción de Energía(%): Aporte porcentual por continente a la producción mundial.	3
1.3. Centrales en Construcción	4
1.4. Dinámica de las Centrales Nucleares	4
1.5. Producción Estimada	6
1.6. Mapa de Sistemas interconectados	7
1.7. Energético - Tipo de Central	8
1.8. Proyección por tipo energético	8
1.9. Restricciones de Gas desde Argentina (% respecto de requerimientos normales)	9
1.10. Energía Embalsada SIC	10
1.11. Costo de Energía	10
1.12. Capacidad instalada vs Requerida	11
1.13. Proyección de costos promedios de generación eléctrica para el año 2010 . .	12
1.14. Rango de costos nivelados para plantas de generación a carbón, gas y nuclear (USD/MWh)	13
1.15. Sensibilidad a cambio en el costo de los combustibles	14
1.16. Impacto de cambio en costo de combustible en el costo de generación	14
1.17. Emisiones equivalentes de CO2 para distintos tipos de energía (gram/KWH)	16
1.18. Fisión nuclear	22
1.19. Producción mundial (tU)	23
1.20. Producción América del sur (tU)	23
1.21. Modelo de contenedores de desechos	25
2.1. Fundamentos de Seguridad	31
2.2. Estaciones meteorológicas que recolectan información del viento	47
2.3. Estaciones meteorológicas que recolectan información de las precipitaciones	47
2.4. Estaciones meteorológicas que recolectan información de las temperaturas .	48

2.5. Períodos de medición de alturas horarias del nivel del mar en las estaciones costeras.	49
2.6. Diagrama de flujo general para los procedimientos de exploración y evaluación	71
2.7. Características de los emplazamientos no relacionados con seguridad	87

Índice de cuadros

1.1. Producción Estimada	5
1.2. Tipos de Reactores: Agua ligera y pesada	18
1.3. Tipos de reactores: moderados por grafito y FBR	19
2.1. Estaciones meteorológicas chilenas según las variables que mide	46
2.2. Estaciones por región	46
2.3. Potencia a diciembre 2007	88

Introducción

La energía es un bien necesario y altamente demandado que va de la mano con el desarrollo de los países. Existen muchas fuentes de producción de energía, entre ellas la nucleoelectricidad, alternativa que es ampliamente utilizada en el mundo entero, incluso en latinoamérica donde países vecinos como Argentina y Brasil están utilizando estas tecnologías.

En nuestro país las fuentes energéticas son diversas pero dependientes de otros países, lo cual es un riesgo que puede ser disminuido ampliamente con una planta nuclear de generación eléctrica en nuestro territorio. La competitividad de la nucleoelectricidad está comprobada y se establece como una opción real para diversificar nuestra matriz energética.

Es por este motivo que decidimos investigar sobre este tema y buscar la manera de hacer un aporte a nuestro país sobre el mismo.

La instalación de una central nuclear es un proyecto, y como tal requiere de estudios y análisis que determinen la conveniencia o no del mismo antes de su puesta en marcha: estudios de prefactibilidad. Una de las primeras cosas se deben determinar es la ubicación de la planta, dependiendo de eso se define por ejemplo el diseño, los planes de emergencia, etc.

Nuestro trabajo está enfocado en esto, en analizar los factores necesarios que se deben considerar al momento de escoger una ubicación definitiva para este proyecto. Nos basamos en la experiencia internacional y la contrastamos con nuestro país para dar a conocer qué tan preparados estamos, hablando principalmente de los organismos nacionales, para enfrentar y desarrollar los estudios que exige la Agencia Internacional de Energía Atómica y otros análisis necesarios concernientes con la viabilidad económica.

En el primer capítulo damos a conocer antecedentes generales que a nuestro parecer son de gran relevancia y que tienen que ver con la situación actual de la nucleoelectricidad y su entorno, el segundo capítulo contiene la base de nuestra tesis donde hablamos de los recursos e información necesarios para la evaluación de la localización incluyendo factores de seguridad y otros no relacionados con seguridad, para finalizar con las conclusiones que hemos desarrollado después de nuestra investigación.

Capítulo 1

Antecedentes Generales

1.1. Mercado Mundial

En el mundo existen actualmente en funcionamiento 439 centrales nucleares distribuidas en 30 países con un total neto de capacidad instalada de 372.100 MW(e). El país que más centrales tiene es Estados Unidos: 104 centrales operativas productoras en conjunto de 100.853 MW(e). En América del sur los países que poseen plantas nucleares son Argentina y Brasil. Ambos poseen dos centrales operativas. El primero cuenta con los reactores Atucha-1 en Buenos Aires y Embalse en Córdoba conectadas al sistema en 1974 y en 1983 respectivamente. El segundo tiene Angra 1 y Angra 2 ambas ubicadas en Río de Janeiro cuyas conexiones fueron en los años 1982 y 2000.

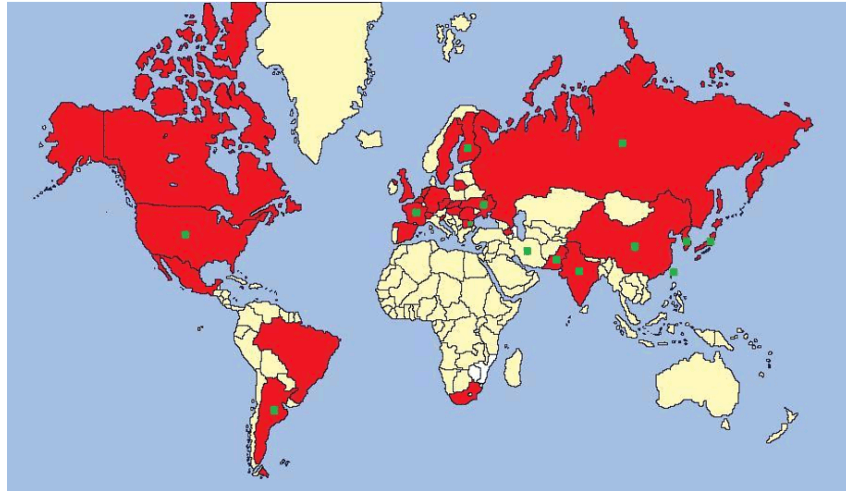
Las centrales nucleares generalmente son proyectadas para operar durante 40 años de explotación comercial, aunque este período puede extenderse. La edad de las plantas nucleares se encuentra en un rango de 1 a 41 años, la mayoría, 33 plantas, tienen 24 años, que es el promedio de edad general. La masa se concentra en los 20 y 28 años. La edad media de las centrales nucleares existentes en Europa se aproxima a los 25 años, en el caso particular de Francia la edad media bordea los 20 años, en Reino Unido dicho valor es cercano a 30 y en Alemania 25 años. Como puede desprenderse de estos datos está previsto que las centrales nucleares envejecidas se cierren en los próximos 10 a 20 años¹.

Actualmente hay 38 plantas en construcción, siendo los países con el mayor número de proyectos, Rusia y China, con un total de 8 de ellos. Estas plantas producirán en conjunto 32.648 MW(e) adicionales. En el siguiente mapa (figura 1.1²) se destacan con rojo los países que poseen centrales nucleares y con un cuadrado verde aquellos que tienen centrales nucleares en construcción.

¹Fuente: Comisión de las Comunidades Europeas, Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo. Bruselas, Octubre 2007.

²En el anexo 1 se muestra una tabla con esta información en detalle.

Figura 1.1: Plantas Nucleares Operativas y en Construcción por país

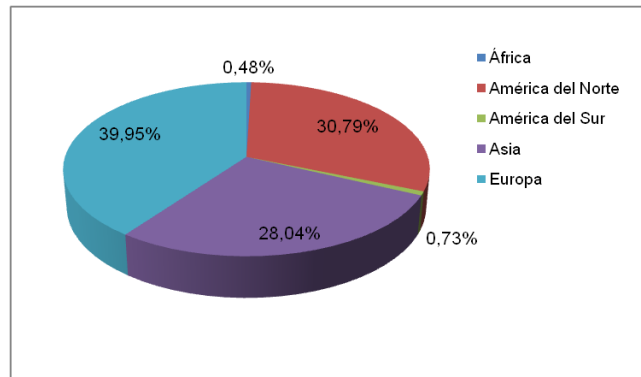


Elaborado en base a datos de IAEA PRIS

Como se puede observar, las grandes potencias están desarrollando y utilizando energía nuclear, energía que se utiliza entre otras cosas con fines agrícolas, médicos y puramente energéticos en forma principalmente de electricidad. En los países europeos esto se ve con mayor claridad. El porcentaje de utilización de nucleoelectricidad dentro del total de energía eléctrica del país es muy grande alcanzando en promedio un 37,4%.³

El país que utiliza la mayor cantidad porcentual de esta energía es Francia con un 76,8%. Además, este continente es el que mayor energía eléctrica produce, seguido por Asia y América del Norte, lo cual se puede apreciar en la Figura 1.2 Mayor detalle en el Anexo 2.

Figura 1.2: Producción de Energía(%): Aporte porcentual por continente a la producción mundial.

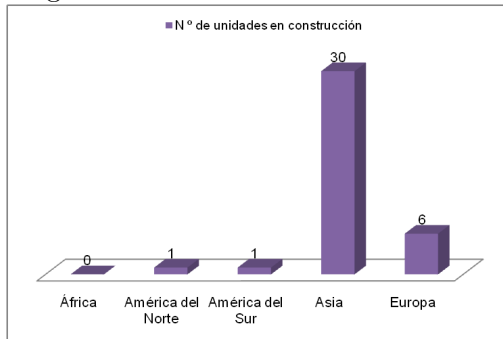


Elaborado en base a datos de IAEA PRIS

³Esta información se puede ver en el gráfico “Porcentaje de Nucleoelectricidad” en el Anexo 2

Otro aspecto importante que refuerza esta idea es la cantidad de construcciones en curso, liderados por Asia, tal como se muestra en la Figura 1.3 , continente donde todos los países que tienen centrales nucleares están además construyendo nuevas centrales.

Figura 1.3: Centrales en Construcción

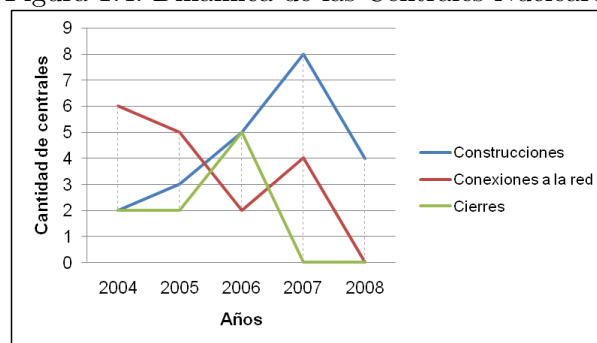


Elaborado en base a datos de IAEA PRIS

La central que se está construyendo en América del sur es Atucha-2 en Córdoba Argentina, cuya fecha de conexión se espera para octubre del 2010.

La dinámica de centrales nucleares ha sido, desde el 2004 al 2008, como se representa en la Figura 1.4.

Figura 1.4: Dinámica de las Centrales Nucleares



Elaborado en base a datos de IAEA PRIS

En el gráfico (figura 1.4) vemos las construcciones iniciadas y reanudadas, las conexiones a red, nuevas y reactivadas, y los cierres de plantas. Podemos ver que las conexiones a red superan con creces los cierres de plantas excepto el año 2006; en total han habido 8 conexiones más que cierres indicando un crecimiento de la cantidad de plantas reforzado por la cantidad de plantas en construcción que en total han sido 21⁴ estos últimos cuatro años.

⁴Han iniciado su construcción 21, reactivado su construcción 1 y suspendido su construcción 1.

Las razones para cerrar las plantas nucleares generalmente tienen que ver con el fin de su vida útil proyectada. También existen motivos políticos, generados por intereses partidistas o de la comunidad, para cerrar plantas nucleares. Por ejemplo, a mediados de 2004 en un estudio sobre la nueva política energética nacional, Bélgica anuncia su planificación de supresión gradual de la energía nuclear hasta el año 2030, comenzando con el cierre de plantas en 2015. En Bulgaria a finales de 2006 se cerraron dos unidades de los cuatro reactores en funcionamiento de la planta Kozlody, debido a compromisos asumidos en las negociaciones de adhesión. Como condición para su adhesión a la Unión Europea, Lituania acordó cerrar sus dos reactores nucleares de tipo ruso en Ignalina, los cuales no se consideraba que pudieran mejorarse de forma rentable. Por los mismos motivos, en 2005, la situación se repite con los reactores tipo ruso, Bohunice 1 y 2, de Eslovaquia. En Alemania se creó una ley sobre la eliminación gradual de las centrales nucleares, Atomausstiegsgesetz, según la cual se acuerda que el total de energía nucleoelectrónica que debe producirse se limita a 32 años. A partir de ello, comenzaron los cierres de plantas nucleares, Stade en 2003 y Obrigheim en 2005.

La producción de energía nuclear hasta el año 2030 se estima como se observa en la Tabla 1.1.

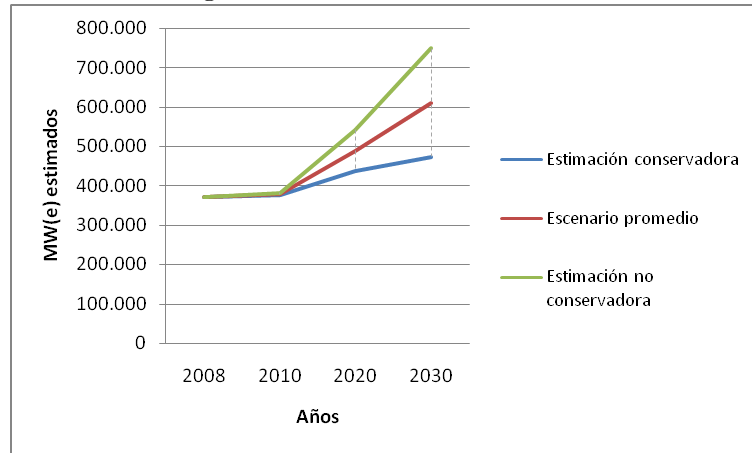
Cuadro 1.1: Producción Estimada

	2010	2020	2030
Estimación conservadora	376.000	437.000	473.000
Estimación no conservadora	383.000	542.000	748.000

Elaborado en base a datos de Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030

Cuya tendencia se puede ver con mayor claridad en la Figura 1.5 , que nos muestra la tendencia al alza de la producción de energía nuclear que no supera los 500.000 MW(e) en un escenario conservador y que llega casi a las 750.000, más del doble de la producción actual, en un escenario no conservador. Estableciendo bajo estos parámetros un escenario intermedio y más probable, tenemos que para el 2030 el mundo estaría relativamente cerca de duplicar la producción de este año:

Figura 1.5: Producción Estimada



Elaborado en base a datos de Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030

Esta tendencia, junto con lo expuesto anteriormente, demuestra el aumento de la utilización de la energía nuclear en el mundo, lograda en parte por la gran experiencia adquirida desde los años 50 y las constantes investigaciones que le da confiabilidad a esta tecnología en constante mejora. Las grandes potencias mundiales están utilizando esta fuente de energía, nutriéndose de sus beneficios, disminuyendo el riesgo de dependencia energética al tener una matriz diversificada, evitando daños al medio ambiente (y a la vez un posible impuesto por emisión de CO₂), y asegurando energía, bien que con el tiempo se ha vuelto escaso y que es un motor importante para el crecimiento y potencialización de las naciones, debido a que es una fuente energética es muy estable y de largo plazo.

1.2. Por qué estudiar la opción nucleoelectrónica

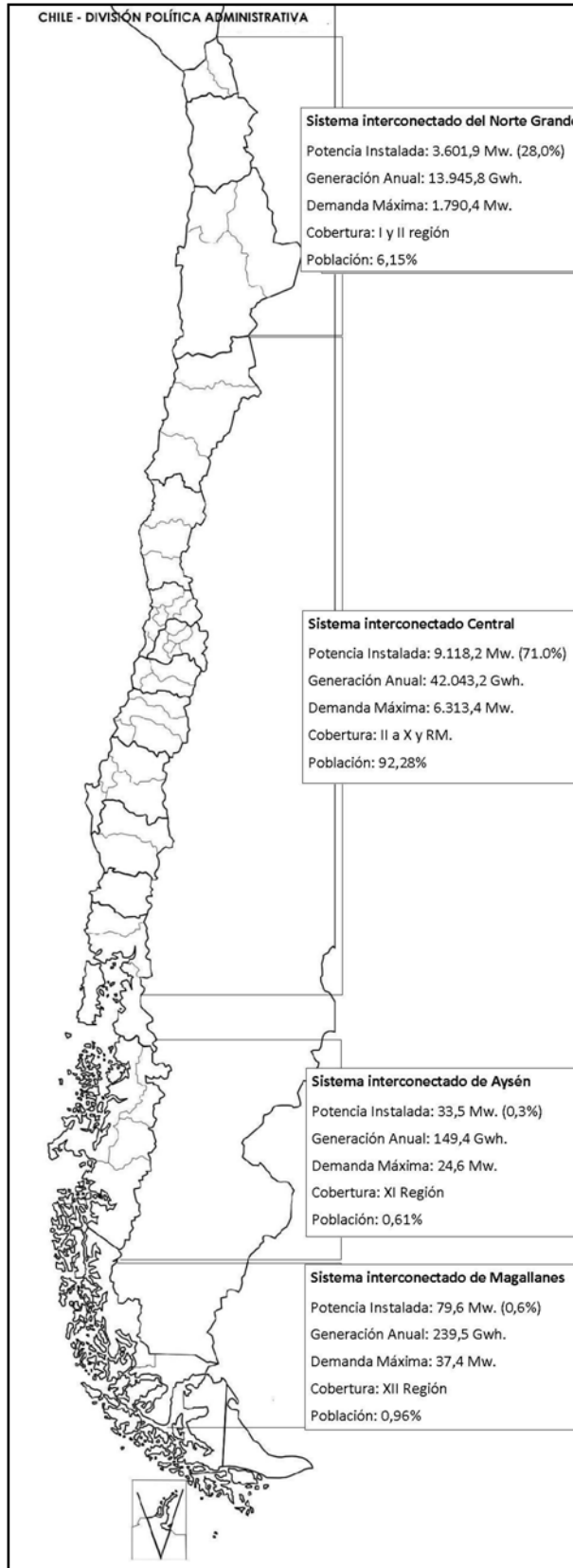
El mercado eléctrico en Chile

El mercado eléctrico está dividido en las actividades de generación, transmisión y distribución de la energía a los consumidores, que a su vez están divididos en regulados (con potencia conectada menor a 2000 Kw.) y no regulados, que cuentan con potencia instalada mayor a 2000 Kw.

En Chile existen cuatro sistemas interconectados eléctricos que a diciembre del año 2007 contaban con las características⁵ que muestra la figura 1.6.

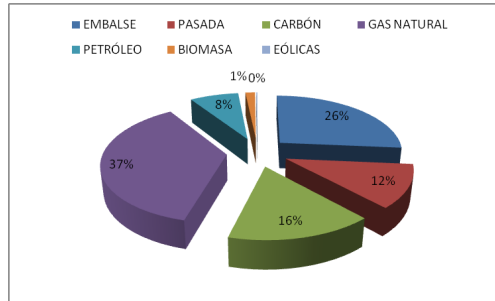
⁵Fuente: Anuario "Estadísticas sector energía en Chile", CNE.

Figura 1.6: Mapa de Sistemas interconectados



Dentro de la capacidad instalada con la que cuenta el país, si se realiza una distinción por tipo de generación se tiene que (figura 1.7):

Figura 1.7: Energético - Tipo de Central



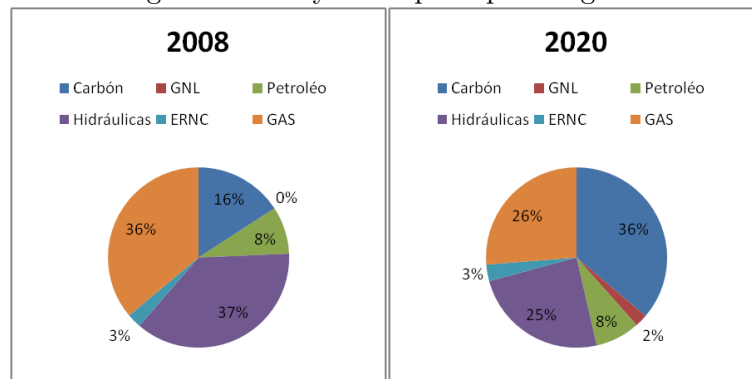
Elaboración en base a datos de la Comisión Nacional de Energía

En el gráfico (figura 1.7) podemos apreciar que la generación térmica ocupa el primer lugar entre la infraestructura de generación instalada en el país gracias a los aportes del gas y del carbón. El segundo tipo de generación con mayor presencia es la hidráulica de embalse y pasada.

Al analizar por sistema encontramos una importante diferencia entre el tipo de generación ya que en el SING la generación térmica tiene el 99,6% contra un 0,4% en hidráulica de pasada. En el SIC en cambio, la situación es inversa, aunque no de manera tan marcada, la potencia instalada en generación hidráulica ocupa el primer lugar con un 53,5% versus un 46,3% de la generación térmica.

En base a los proyectos aprobados e ingresados al SEIA la proyección al 2008 y 2020 por tipo de energético utilizado sería la presentada en la figura 1.8 ⁶:

Figura 1.8: Proyección por tipo energético



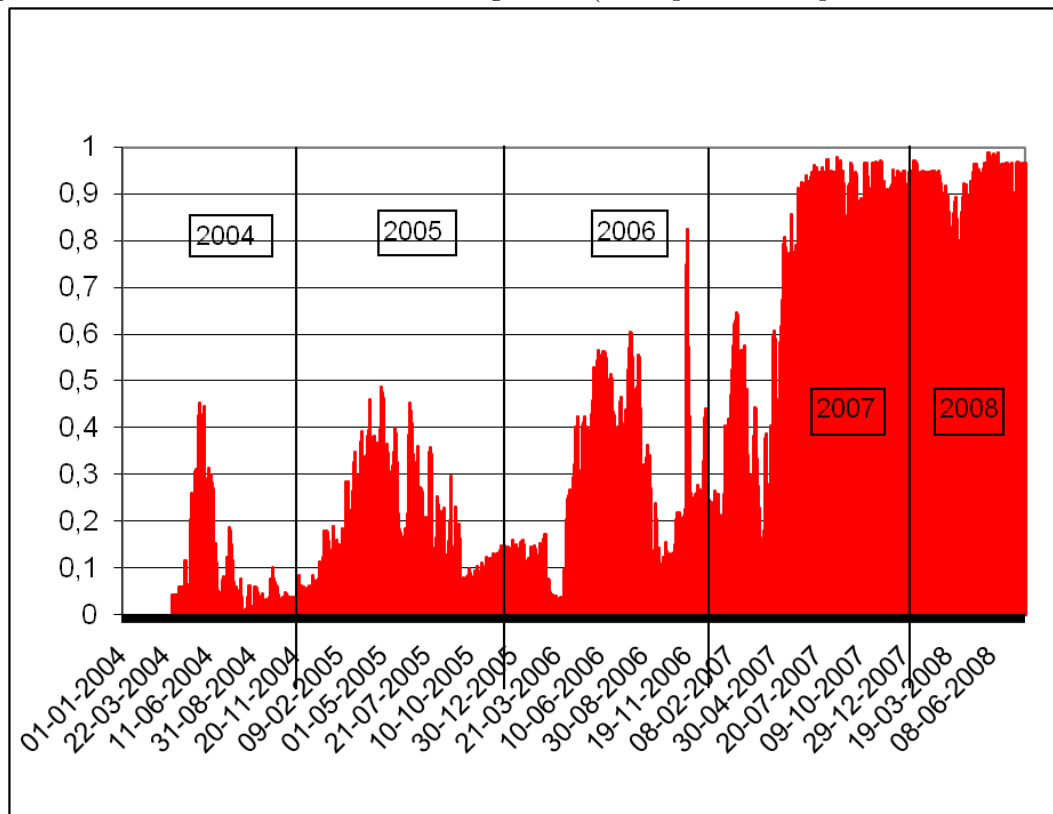
Elaboración en base a datos de la Comisión Nacional de Energía

⁶Marcelo Tokman, Ministro de Energía, CNE.

Podemos apreciar que las fuentes principales de generación en el mediano plazo siguen siendo las mismas, a pesar de cambiar su posición relativa. El problema que esto plantea es el hecho de seguir con una alta dependencia tanto de combustibles importados, como el gas, el GNL, el petróleo y el carbón (ya que si bien en el país existen reservas de carbón, son en su mayoría económicamente menos convenientes que la importación), y a las fuentes hidráulicas, que dependen fuertemente de un factor tan variable e inmanejable como las precipitaciones, que permitan mantener los embalses con una cota suficiente para la generación eléctrica.

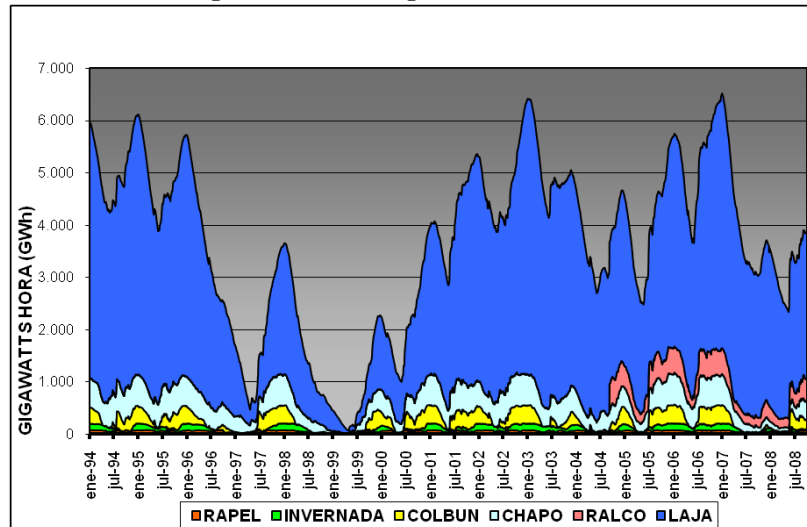
Los siguientes gráficos (figuras 1.9 y 1.10) confeccionados por la CNE muestran las restricciones en el envío de gas desde Argentina y la cantidad de energía embalsada en el SIC y ofrecen una clara perspectiva del riesgo que enfrenta la matriz de generación eléctrica chilena, sin considerar el impacto económico de la variabilidad en los precios de los combustibles.

Figura 1.9: Restricciones de Gas desde Argentina (% respecto de requerimientos normales)



Fuente: CNE

Figura 1.10: Energía Embalsada SIC

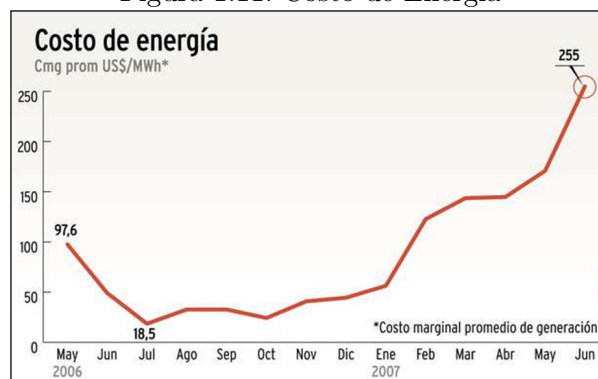


Fuente: CNE

La figura 1.9 demuestra claramente que el gas natural argentino ya no es un recurso disponible para generar electricidad en el país, cediendo su lugar a alternativas térmicas más caras y contaminantes mientras que el segundo la alta volatilidad de las cotas de los embalses lo que hace necesario, a pesar de las ventajas en costo y emisiones de esta fuente, buscar métodos alternativos de generación para reducir el riesgo de desabastecimiento energético y consolidar una matriz que apoye firmemente el desarrollo futuro.

Además, la figura 1.11 muestra como ha evolucionado el costo de la energía muestra una tendencia al alza, lo que es atribuible en parte a los cortes de gas natural argentino, que claramente ofrecía grandes ventajas en costos, lo que no ocurre hoy en día con otros combustibles utilizados.

Figura 1.11: Costo de Energía

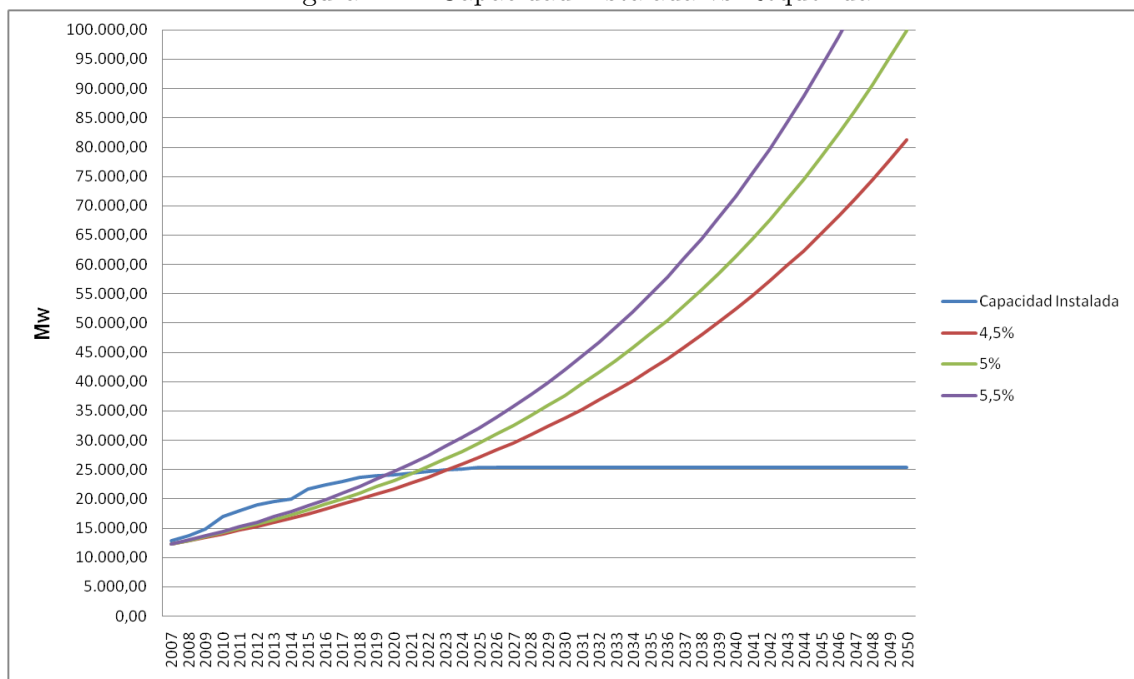


Fuente: La Tercera

La proyección indica que la demanda energética en Chile crecería a una tasa superior al 5% entre el 2008 y el 2030, llegando a situarse en torno a los 25000 MW. Para ese año. Según esos datos la CNE estima que la capacidad instalada requerida para esa fecha podría llegar hasta los 45000 MW. Dejando un margen de seguridad que se podría considerar adecuado de acuerdo a la naturaleza de la matriz.

La Figura 1.12 fue elaborada según datos recogidos del Anuario “Estadísticas del sector energía” del año 2007 hemos proyectado la demanda futura de electricidad, con tasas del 4,5%, 5% y 5,5% añadiendo un margen de seguridad de un 50%, inferior al margen sobre demanda máxima de la capacidad instalada promedio que entre el año 1998 y 2008 que fue de un 63,7% de la demanda máxima anual, junto con proyectar la capacidad instalada al año 2008 según la capacidad actual, el plan de obras en construcción y recomendadas⁷ del SIC y del SING, extraído de la CNE, y el estudio “Estimación del aporte potencial de las Energías Renovables No Convencionales y del uso eficiente de la energía eléctrica al SIC en el periodo 2008-2025” que estima en 4402 MW el potencial de generación al año 2025 con ese tipo de fuente en el escenario dinámico(intermedio).

Figura 1.12: Capacidad instalada vs Requerida



Elaborado en base al Anuario “Estadísticas del sector energía” del año 2007

⁷Fuente: CNE

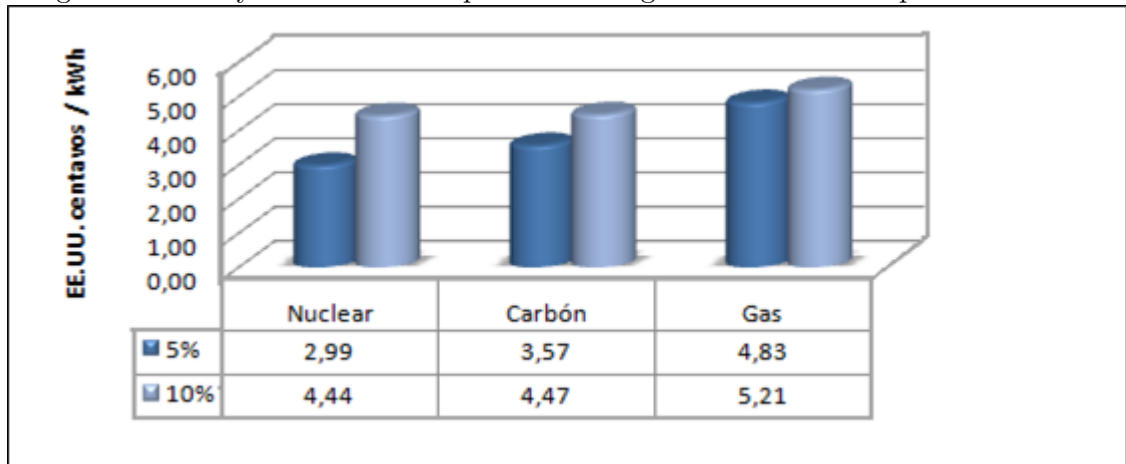
El gráfico (figura 1.12) sólo muestra incrementos de la capacidad instalada según las obras y las recomendaciones de los sistemas interconectados del norte y central, más la proyección de la capacidad de generación económicamente factible de generación por ERNC según los resultados del estudio ya mencionado, y por lo tanto no representa el crecimiento esperado real al año 2050. Sin embargo, se muestra que existe una gran brecha a ser cubierta por una adecuada combinación de tecnologías que garanticen no solamente que se cuente con la suficiente capacidad instalada sino que además sea capaz de enfrentar contingencias de diversa naturaleza, tales como las climáticas, las económicas por el incremento excesivo de algún combustible, alguna escasez como la ocurrida con el gas natural argentino y cualquier otra que pueda eventualmente poner freno al desarrollo económico del país y la consiguiente mejora en el bienestar de las personas que viven en él.

Competitividad de la Generación Nucleoeléctrica.

La experiencia internacional demuestra que la energía nuclear es competitiva debido a sus bajos costos de producción que compensan el alto capital que involucra este tipo de proyectos e incluso incluyendo los costos de desmantelamiento y de gestión de residuos siempre y cuando no exista un acceso directo de bajo costo a combustible fósiles⁸.

La energía nuclear ha aumentado su competitividad en los últimos años desde 1998⁹.

Figura 1.13: Proyección de costos promedios de generación eléctrica para el año 2010

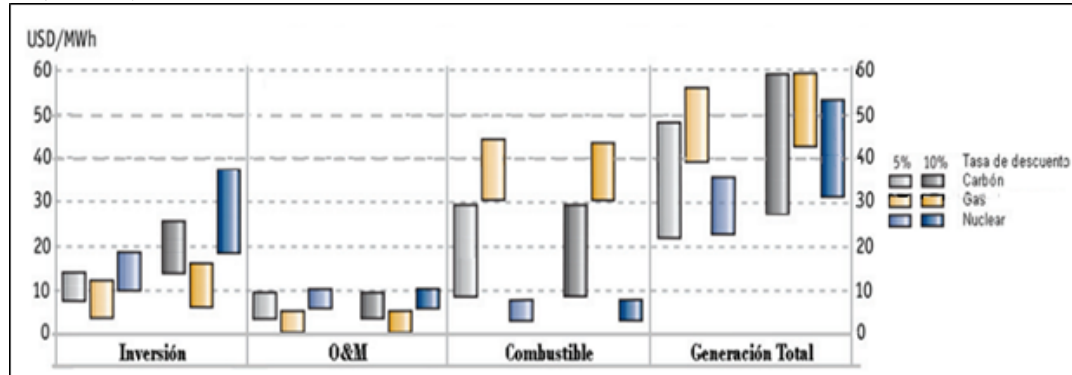


Fuente: Elaborada en base a datos de la OECD

⁸Fuente: World Nuclear Association.

⁹Según el estudio Projected Cost of Generating Electricity, realizado por la OECD, AIE, NEA en el 2005

Figura 1.14: Rango de costos nivelados para plantas de generación a carbón, gas y nuclear (USD/MWh)



Fuente: Projected Cost of Generating Electricity, IEA, NEA, OECD. 2005

La primera figura (1.13¹⁰) muestra una comparación para los costos proyectados hasta el 2010 para la generación eléctrica en base a carbón, gas y nuclear. En la segunda figura (1.14) se resume la comparación de los rangos observados para los costos de inversión, O&M, combustible y generación total. Se concluye en el estudio que la generación nucleoelectrónica es competitiva en costo respecto a otras fuentes fósiles sobre todo en regiones en donde el acceso al combustible es costoso. También se demuestra que es sensible a la tasa de descuento dado que el costo de capital es alto. Los costos de producción pueden ir desde US\$ 1000/kW como los de República Checa hasta US\$2500 en Japón, en comparación con los costos de una planta de carbón que van desde US\$1000-\$1500, para una de gas de \$500-\$1000 y una eólica \$1000-\$1500.

Es importante recordar que ante comparaciones de costo de producción para generación de electricidad de las distintas fuentes, se debe determinar cuáles son los costos que se está comparando, ya que en el caso de la energía nucleoelectrónica existen costos directos (como el desmantelamiento y el manejo de los desechos) que en otros tipos de generación son considerados indirectos. Es por esto, que se debe dejar constancia de la estructura de costo a comparar, ya que de otro modo será inconsistente la comparación.

Siguiendo con el paralelo, uno de los factores que hace atractivo ese tipo de energía es la baja proporción del costo en combustible al costo total de generación en comparación con fuentes fósiles. Todo el tratamiento del ciclo del combustible, incluido el almacenamiento de combustible usado o eliminación de residuos en un repositorio, contribuye hasta un 10% de

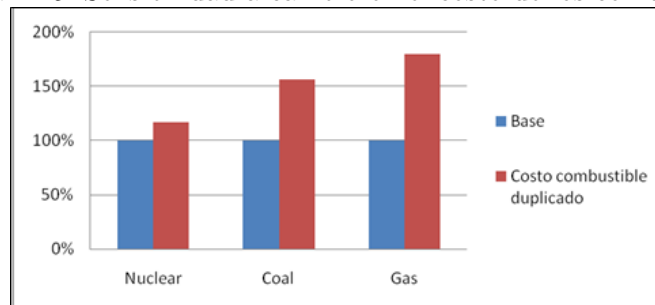
¹⁰Se utilizan datos del Projected Cost of Generating Electricity. Esta investigación se basa en una muestra de 63 plantas de los países de la OECD: 27 plantas de carbón, 23 de gas y 13 plantas nucleares. Considerando un factor de uso de 85% y una vida útil de 40 años para las plantas nucleares y de carbón y entre 20 a 30 años para las plantas a gas. En cada categoría son excluidos los 5% más altos y más bajos valores.

los costes globales por KWH, incluso menos si hay vertido directo de combustible utilizado en lugar de reprocesamiento¹¹.

Otra importante consideración económica que debe ser analizada es la sensibilidad a los costos de los combustibles que presentan los diferentes tipos de generación ya que es hoy en día un importante componente de la decisión de inversión al presentar una alta volatilidad en los mercados internacionales, agregando incertidumbre a la evaluación de la opción de instalar un tipo de planta determinado o su posterior rentabilidad económica.

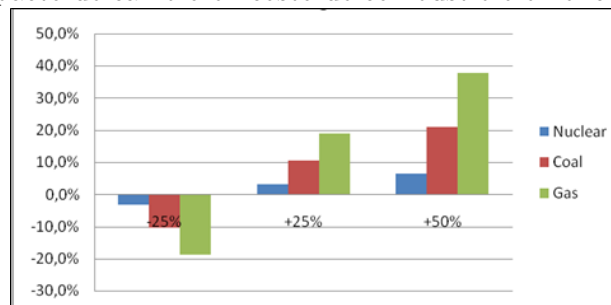
A continuación presentamos dos estudios que muestran que la alternativa nuclear es menos sensible a los cambios en el costo del combustible. El primero¹² indica que con un aumento del 100% en el precio de los combustibles el costo de generación aumentaría en un 16,21% en la generación nucleoelectrónica, un 55,44% en la generación a carbón y un 79,01% en la generación por gas natural.

Figura 1.15: Sensibilidad a cambio en el costo de los combustibles



Fuente: “Levelized costs for nuclear, gas and coal for Electricity, under the Mexican scenario”

Figura 1.16: Impacto de cambio en costo de combustible en el costo de generación



Fuente: “Nuclear Power: Least-Cost Option for Baseload Electricity in Finland”

¹¹The Economics of Nuclear Power ,World Nuclear Association. Agosto 2008.

¹²“Levelized costs for nuclear, gas and coal for Electricity, under the Mexican scenario”, Javier C. Palacios, Gustavo Alonso, Ramón Ramírez, Armando Gómez, Javier Ortiz, Luis C. Longoria. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México

En el segundo¹³ los autores realizan un análisis dinámico en base a plantas generadoras en funcionamiento en ese país que los lleva a concluir que la alternativa de generación menos sensible a los cambios en el costo del combustible es la nuclear, con los siguientes resultados mostrados en las figuras 1.15 y 1.16 respectivamente.

En conclusión, la generación nucleoelectrica se ha vuelto competitiva respecto a las fuentes fósiles, principalmente por los bajos costos de producción, por el bajo costo del combustible nuclear respecto a los combustibles utilizados en los otros tipos de generación y por no tener gran impacto las variaciones del precio del combustible sobre los costos de producción.

Existe otro factor de costo que hay que considerar, que es el factor de carga que corresponde al porcentaje de la máxima energía que puede suministrar la central a la red, dicho factor solo está limitado por los periodos de recarga de combustibles, las contingencias que la obligan a salir del sistema, y los periodos de mantenimiento.

El costo de la energía nuclear se ve beneficiada al incrementar el factor de carga, más que en centrales a carbón, petróleo y el gas¹⁴.

Las centrales nucleares han aumentado su factor de carga alrededor de un 90%, es decir, el 90% del tiempo están generando a máxima potencia. Hay que considerar que el costo unitario de generación de una central cuando opera no es el mismo que el costo de la misma central incluyendo los tiempos en que no opera, es decir, incluyendo el capital inmovilizado¹⁵.

Emisiones de Gases Efecto Invernadero (gei)

Actualmente, para la industria energética, la emisión de GEI (principalmente dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y óxido de azufre), se ha transformado en el problema ambiental más importante y con mayor repercusión.

Es por esto, que a medida que el desarrollo económico de cada nación aumenta y por ende, la demanda y consumo energético, se ha generado una creciente conciencia por mitigar, solucionar y evitar el avance de este problema.

Dentro del ámbito internacional, existen varias corrientes en donde apoyan la nucleoelectrica como fuente de carácter limpio de energía.

Cuando se sustituye la generación a carbón por la nuclear, se pueden llegar a evitar cerca de 6 a 7 millones de toneladas de CO₂ al año¹⁶.

¹³“Nuclear Power: Least-Cost Option for Baseload Electricity in Finland”, Risto Tarjanne, Sauli Rissanen, The Uranium Institute 25th Annual Symposium 30 August-1 September 2000: London

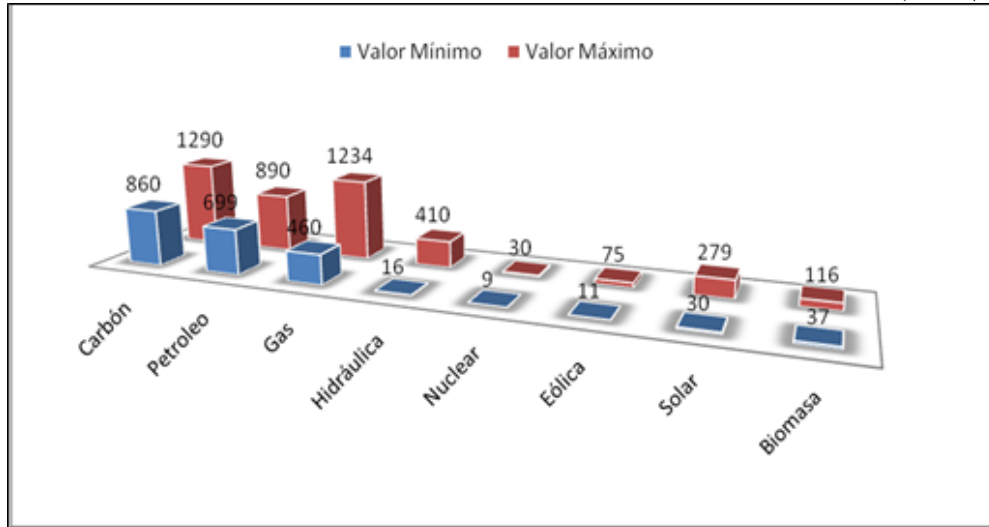
¹⁴Fuente: OECD IEA 1992.

¹⁵Información entregada por Gonzalo Torres Oviedo, Ingeniero civil mecánico con postgrado en Energía Nuclear y Jefe del Departamento de Materiales Nucleares de Comisión Chilena de Energía Nuclear.

¹⁶Energy Technology Essentials, IEA.

Es más, la energía nuclear podría ser una contribución de entre el 6% y el 10% a nivel mundial en la reducción las emisiones de CO2 a mediados de siglo¹⁷.

Figura 1.17: Emisiones equivalentes de CO2 para distintos tipos de energía (gram/KWH)



Fuente: OIEA

La figura 1.17¹⁸ muestra tasas máximos y mínimos de emisiones de CO2 generadas por distintas fuentes. Se observa que las tasas de la Nucleoelectricidad son mucho menores que las emitidas por la generación con gas natural, petróleo o carbón. Por otro lado, las emisiones por generación nuclear son comparables con fuentes renovables como la hidráulica, eólica, solar, entre otras.

Aunque existe una gran cantidad de información en la cual se afirma el carácter limpio de la energía nuclear, tanto en las emisiones de gases como en el depósito de los desechos, los cuales serán tratados en otro punto de esta tesis, surgen considerables dudas, como las planteadas en el Informe de la Comisión Zanelli, respecto a si la condición de carácter limpio se mantiene durante todo el proceso de generación, desde la minería de uranio hasta el desmantelamiento y deposición final de los residuos. Es por lo mismo, que se plantea en el mismo informe que es necesario estudiar desde una perspectiva del ciclo completo. Pero también se muestra como un punto a favor para una opción de generación limpia.

¹⁷Energy Technology Perspectives (IEA, 2006). Supuesto: un precio del carbón de US \$ 25/ tCO2, por lo que se proyectaría que el porcentaje de la generación nucleoelectrónica en el mundo aumentará a partir de la actual 16% a un 19% -22% para el año 2050. Si así sucediera, la capacidad nuclear se habrá más que duplicado para fines del 2050, esto da la importancia para la contribución a la disminución del CO2.

¹⁸Publicación Comparing Energy Options de Hans Holger Rogner y Arshad Khan, Jefe y miembro del personal respectivamente de la sección de Planificación y Estudios Económicos del Departamento de Energía Nuclear.

1.3. Otros aspectos importantes a considerar

1.3.1. Reactores Nucleares

Tecnología actual y en desarrollo de reactores nucleares

Para cumplir el objetivo de determinar la localización óptima para una planta de energía nuclear en Chile, es importante conocer las características de los actuales reactores existentes en el mundo, así como también las tecnologías que se encuentran en desarrollo y que representan en el futuro en lo que a generación nucleoelectrónica se refiere.

La generación nucleoelectrónica se basa en la transformación de la energía contenida en el átomo, por ejemplo mediante la ruptura (fisión) de núcleos atómicos, en calor. Un reactor donde se produce esta transformación es, básicamente, un calentador de agua que produce vapor. El vapor se produce ya sea directamente en el refrigerante que circula a través del reactor, o indirectamente vía transferencia de calor a un sistema de refrigeración secundario. Este vapor origina el movimiento de las turbinas, que producen la electricidad.

Los principales fabricantes de reactores en el mundo son FRAMTOM (Francia), Westinghouse-Toshiba (EEUU-Japón), GE-Mitsubishi (EEUU-Japón), Areva-Siemens-Hitachi (Francia-Alemania-Japón), ROSATOM (Federación Rusa) y otros consorcios que en realidad son asociaciones estratégicas de estos mismos actores.

Existe gran variedad de reactores nucleares en cuanto a su diseño y componentes. Sin embargo todos constan de cinco componentes básicos:

- **Combustible.** Es el material que sufre el proceso de fisión, y que se utiliza simultáneamente como fuente de energía y fuente de neutrones para mantener la reacción en cadena. Los materiales más utilizados como combustible son: uranio metálico; aleaciones de uranio; UO_2 cerámico; y óxidos mixtos de uranio y plutonio.
- **Moderador.** Los neutrones obtenidos de la fisión nuclear emergen con velocidades muy altas (neutrones rápidos). Para asegurar continuidad de la reacción en cadena, es decir, procurar que los "nuevos neutrones" sigan colisionando con los núcleos atómicos del combustible, es necesario disminuir la velocidad de estas partículas (neutrones lentos). Se disminuye la energía cinética de los neutrones rápidos mediante choques con átomos de otro material adecuado, llamado moderador. Se utiliza como moderador el agua natural (agua ligera); el agua pesada (deuterada); el Carbono (grafito); BE, óxido de BE; y parafinas e hidrocarburos.
- **Refrigerante.** El calor producido en el núcleo debe extraerse por dos razones, una prevenir el daño estructural al núcleo y otra para utilizar la energía generada para producir electricidad. La función esencial del refrigerante es extraer ese calor. Por

ello debe tener gran fluidez a la temperatura de operación del reactor, lo que hace pensar en gases y líquidos. Se puede utilizar de refrigerante el agua ligera, el agua pesada, el anhídrido carbónico, etc..

- Elementos de control. El control del reactor se consigue interfiriendo en la economía neutrónica para cambiar el factor de multiplicación efectivo. Para ello se emplean materiales absorbentes de neutrones combinados con el moderador o se modifican las características de fugas del reactor. El método más extendido es el de la absorción parasitaria. Se emplea boro, cadmio, plata, indio en forma de barras que se pueden insertar aumentando o disminuyendo el factor de multiplicación; o bien añadir al refrigerante un soluto absorbente.
- Elementos estructurales. Son aquellos componentes, soportes, columnas, guías, elementos de fijación, etc. que proporcionan al núcleo su configuración adecuada. Su función es variada: revestimiento del combustible, dirección del refrigerante, etc.

Los tipos de reactores actualmente disponibles se pueden clasificar de la siguiente manera¹⁹:

1. Reactores convencionales:

Cuadro 1.2: Tipos de Reactores: Agua ligera y pesada

Tipo de Reactor	Reactores de Agua Ligera (LWR)		Reactores de Agua Pesada (HWR)
	Reactores de Agua en Ebullición (BWR)	Reactores de Agua a Presión (PWR)	
Propósito ¹	Electricidad	Electricidad, embarcaciones nucleares	Electricidad; producción de Plutonio
Tipo de Refrigerante	Agua (H ₂ O)	Agua	Agua pesada (óxido de deuterio, D ₂ O)
Tipo de Moderador	Agua	Agua	Agua pesada
Composición química del combustible ²	Dióxido de Uranio	Dióxido de Uranio	Dióxido de Uranio o metal
Grado de enriquecimiento del combustible ³	Bajo enriquecimiento	Bajo enriquecimiento	Uranio natural (no enriquecido)
Comentarios	El vapor generado dentro del reactor va directamente a la turbina	El vapor es generado fuera del reactor en un loop secundario de transferencia de calor	Usado en Canadá: llamado CANDU - "Canadian Deuterium Uranium"

Fuente: CCHEN

¹⁹Fuente: <http://www.cchen.cl>

Cuadro 1.3: Tipos de reactores: moderados por grafito y FBR

Tipo de Reactor	Reactores moderados por grafito		Reactores Reproductores Rápidos (FBR)
	Refrigerados con gas	Refrigerados con agua	Metal Líquido
Propósito ¹	Electricidad	Electricidad; producción de plutonio	Electricidad; producción de plutonio
Tipo de Refrigerante	Gas (dióxido de carbón o helio)	Agua	Sodio líquido o fundido
Tipo de Moderador	Grafito	Grafito	No requerido
Composición química del combustible ²	Dicarburo de uranio o uranio metálico	Dióxido de uranio (RBMK) o metálico (N-Reactor)	Dióxido de plutonio y dióxido de uranio en varios arreglos
Grado de enriquecimiento del combustible ³	Ligeramente enriquecido, uranio natural	Ligeramente enriquecido	Varias mezclas de plutonio-239 y uranio-235
Comentarios	Usado en Gran Bretaña y Francia (AGR, MAGNOX)	Usado en Unión Soviética, Chernobyl (RBMK); N-Reactor en Hanford.	Los reactores reproductores son diseñados para producir más material fósil de lo que consumen (Monju, Phoenix).

Fuente: CCHEN

- a) El propósito del reactor no depende de la selección del refrigerante o moderador, sino más bien del tamaño de éste y cómo es operado, y sobre qué materiales auxiliares están puestas las barras de combustible. Los mismos reactores pueden, en principio, ser usados para producción eléctrica, producción de plutonio, y producción de otros materiales radiactivos tales como el tritio para aplicaciones civiles o militares.
- b) No están incluidos todos los tipos de combustibles necesariamente.
- c) El enriquecimiento del combustible se refiere al porcentaje del isótopo de Uranio-235 comparado con el Uranio-238 presente en el combustible. Se define aquí como sigue: Uranio ligeramente enriquecido = 0.8 a 3%; Uranio de bajo enriquecimiento = 3 a 5%.

Los modelos basados en agua liviana son los diseños dominantes más recomendados entre los que actualmente se encuentran disponibles de forma comercial. Dentro de

estos, los que llevan más años de operación son los de agua liviana presurizada (PWR). En segundo lugar se encuentran los reactores de agua en ebullición (BWR).

De los 434 reactores nucleares de generación que existían hasta septiembre del 2007, 252 son del tipo PWR, 92 del tipo BWR, 34 del tipo CANDU. Además, existen 15 de grafito y agua liviana tipo RBMK (como el de Chernobyl), y dos del tipo Fast Breeders de metal líquido, LMFBR. Estos datos, extraídos del Informe Zanelli, demuestran una clara tendencia hacia el PWR como modelo dominante.

2. Reactores evolutivos actualmente disponibles:

Los diseños avanzados incorporan generalmente mejoras de los conceptos relacionados con la seguridad, incluidas, entre otras cosas, características que permitirán a los operadores disponer de más tiempo para tomar medidas de seguridad, y que proporcionarán una protección aun mayor contra cualquier liberación posible de radioactividad al medio ambiente. Los diseños mejorados también pueden incluir la introducción de características de seguridad pasiva basadas en fuerzas naturales tales como la convección y la fuerza gravedad, lo que permite reducir la dependencia de las funciones de seguridad de los sistemas y componentes activos, tales como las bombas y válvulas.

Se presta gran atención a la simplificación de las actividades de explotación, inspección, mantenimiento y reparación de las nuevas centrales, a fin de aumentar su eficacia general desde el punto de vista de los costos.

Un diseño evolutivo es un descendiente del diseño de una central existente que presenta las mejoras y modificaciones del diseño efectuadas en base al aprovechamiento de la experiencia e incluye nuevos adelantos tecnológicos; el diseño evolutivo de una central requiere a lo sumo ensayos técnicos y confirmatorios previos al despliegue comercial.

Destacan los reactores de diseño ruso VVER, de potencias entre 400 y 1000 MW, de los que ya existen 49 en funcionamiento. Son de tipo PWR, y a los últimos diseños se les ha incorporado sistemas de seguridad pasivos y alcanzan niveles de estándar internacional. El VVER-1000 y VVER-1200 compiten con el AP-1000 de Westinghouse (EEUU).

Por otra parte, Corea del Sur desarrolló los KSNPP-1400, una versión modificada de los reactores de tipo PWR desarrollados en EEUU, con una potencia nominal de 1400 MW.

3. Reactores avanzados o innovativos:

A diferencia de los reactores evolutivos, el diseño de desarrollo incluirá diferencias más significativas con respecto a los diseños de centrales existentes, y puede requerir igualmente la construcción de una planta de demostración y/o planta prototipo antes del despliegue comercial en gran escala. Un diseño de desarrollo que incluye cambios radicales en el diseño puede denominarse diseño innovador, y representa, por lo tanto, una subcategoría especial de diseños de desarrollo.

El diseño de esta nueva generación de reactores nucleares de potencia incluye dos avances fundamentales: 1) la incorporación de sistemas pasivos de seguridad que no dependan de controles activos; y, 2) alcanzar el menor tamaño posible así como su modularidad.

En los PWR hay cuatro modelos desarrollados con potencias entre los 320 a 600 MW/unidad, el AP-600 en EEUU, PIUS y SIR en Europa, y SPWR en Japón. Adicionalmente, está los modelos SMART de Corea del Sur con potencias entre 30 y 300 MW/unidad, y el CAREM en Argentina.

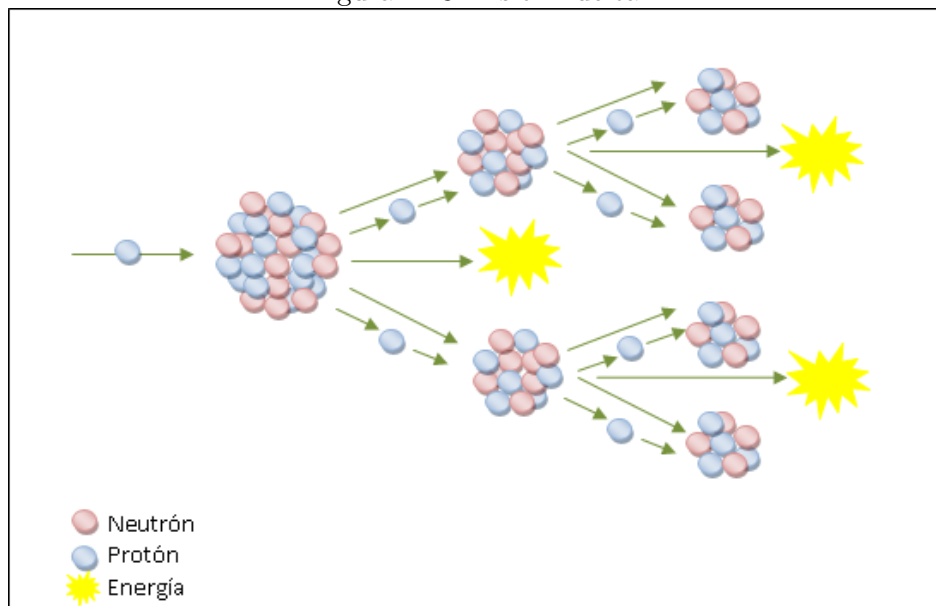
Un desarrollo alternativo es el de reactores refrigerados a gas (por ejemplo He), el HTGR y su versión modular MHTGR, con potencias del orden de 550 MW. En el mismo ámbito están los reactores refrigerados por la técnica de metal líquido, ALMR, con gran capacidad de extracción de calor y cuyos diseños apuntan a 600 MW/unidad. Una ventaja adicional de este tipo de reactor es la menor generación de desechos ricos en actínidos.

Otros reactores que se están desarrollando son los refrigerados por plomo líquido, los de sales fundidas, refrigerados por agua supercrítica (temperatura mayor de 374°C y presión superior a 22.1 MPa).

1.3.2. Mercado del Uranio

La producción de energía nuclear en la actualidad se produce por fisión de núcleos de uranio. Este proceso (figura 1.18) consiste en hacer chocar un neutrón con un núcleo atómico, así este se rompe y emite radiación, nuevos neutrones y energía (200 MeV) que se transforma en calor; los nuevos neutrones chocan con otros núcleos provocando una reacción en cadena.

Figura 1.18: Fisión nuclear



Elaborado en base a imágenes de <http://web.mit.edu>, www.redcientifica.com y exterior.pntic.mec.es.

Entonces, el uranio es la materia prima para la fabricación del combustible que permite la generación de la energía nuclear, he ahí su importancia.

La demanda actual de uranio es de 65.000 toneladas al año²⁰, la que irá creciendo a medida que aumente la puesta en marcha de las centrales nucleares, compensada por la eficiencia de los nuevos reactores.

El precio del uranio se determina en el mercado spot. La información sobre este recurso se encuentra en el URAX, índice de rendimiento total que realiza un seguimiento de las existencias a nivel mundial. Éste está en euros, su equivalente en dólares es el URAXD. El índice de precios se observa en el URAXP y en el URAXPD (en euros y dólares respectivamente) que en la primera semana de diciembre del 2008 se mantuvo alrededor de los US\$ 330²¹.

La principal fuente de uranio es de origen minero (recursos que en el 2005 cubrieron el 64% de la demanda), otras son: combustible reciclado (uranio y plutonio), uranio re-enriquecido, existencias civiles y existencias que en el pasado tenían propósitos armamentistas de uranio y plutonio.

La producción mundial de uranio alcanzó en el año 2007 a 41.279 toneladas y la de América del sur (proveniente de Argentina y Brasil) 229 toneladas²². Como apreciamos en los gráficos siguientes, la producción mundial (figura 1.19) ha ido en un aumento prácti-

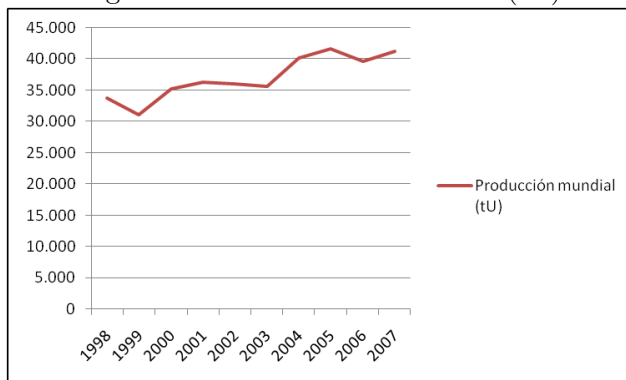
²⁰Fuente: <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>

²¹<http://finance.yahoo.com/>

²²<http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html>

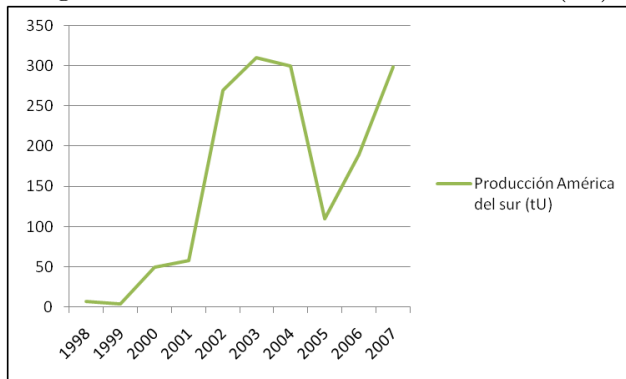
camente constante, mientras que en América del sur se produjo una gran caída en el 2005 que se recuperó el año pasado. La producción de América del sur (figura 1.20) no alcanza a ser el 1% de la producción mundial.

Figura 1.19: Producción mundial (tU)



Elaborado en base a datos de <http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html>

Figura 1.20: Producción América del sur (tU)



Elaborado en base a datos de <http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html>

Los mayores productores de uranio son Canadá (23%), Australia (21%) y Kazakhstan (16%), y los principales proveedores de uranio enriquecido son AREVA (Francia), TENEX (Rusia), URENCO (Alemania, Países Bajos y Reino Unido) y USEC (EEUU).

Los recursos de uranio conocidos han crecido en un 15% en dos años al 2007 por el aumento de las exploraciones que alcanzan una inversión mundial de US\$ 774 millones en los años 2006 y 2007.

En nuestro territorio se están realizando investigaciones para la extracción de uranio. Codelco Norte junto con la Comisión Chilena de Energía Nuclear están estudiando la posibilidad de extraer el mineral existente en Chuquicamata y en Radomiro Tomic. Por otro

lado, la compañía inglesa U3O8 Holdings Plc tiene la concesión para explorar diversos lugares de nuestro país como por ejemplo Callejones, Los Cardones, Peralillo sitios donde ya encontraron uranio y otros como el límite de la Florida con Quillón, el norte del puente Queime, Hualqui, Nacimiento y Angol. Cabe destacar que en Chile a las empresas extranjeras se les permite explorar, sondear y explotar el mineral pero no comprarlo lo cual trae ventajas para nuestro país.

1.3.3. Manejo de desechos radiactivos²³

Como toda industria, la generación nucleoelectrónica produce desechos, que deben ser manejados de tal manera de minimizar el impacto sobre las personas o el medio ambiente.

Quizás las grandes diferencias entre la industria nuclear con otras, son la naturaleza de los desechos, que pueden emitir radiaciones desde centésimas de segundo hasta por varios siglos, y la responsabilidad con que hace frente a este complejo asunto, considerando parte integral de su proceso productivo y estructura de costos el manejo de éstos.

La radiactividad es el decaimiento de algunos elementos, llamados isótopos. Hay tres tipos de radiación a considerar: alfa, beta y gama.

Los desechos radiactivos son variados y su manejo depende de las características que presente cada tipo.

Se pueden clasificar según el nivel de radiación en:

- Desechos de bajo nivel: Es generado por instituciones como hospitales, laboratorios e industrias. Comprende materiales con pequeñas cantidades de isótopos de corta vida. No son peligrosos de manipular pero se debe tener más precaución que con los residuos normales. Generalmente son compactados e incinerados. Comprenden cerca del 90% de los residuos nucleares pero contienen solamente el 1% de la radiactividad.
- Desechos de nivel intermedio: Contiene altas cantidades de radiactividad y puede requerir blindaje especial. Comprende resinas, lodos químicos y componentes del reactor, además de materiales contaminados en el desmantelamiento del reactor. Alcanzan el 7% del volumen con un 4% de la radiactividad. Puede ser solidificado en concreto o material bituminoso para su evacuación.
- Desechos de alto nivel: Puede ser combustible utilizado o desechos provenientes del reprocesamiento. Alcanza el 3% del volumen y el 95% de la radiactividad. Pueden estar activos por largo tiempo y generan una cantidad considerable de calor, lo que hace necesaria su refrigeración y blindaje para su manejo.

²³World nuclear association

Debe considerarse que si bien el manejo de estos desechos puede llegar a ser altamente complejo, el pequeño volumen que representan los desechos en comparación con otros tipos de generación hace que pueda llegar a ser una tecnología competitivamente eficiente en la materia.

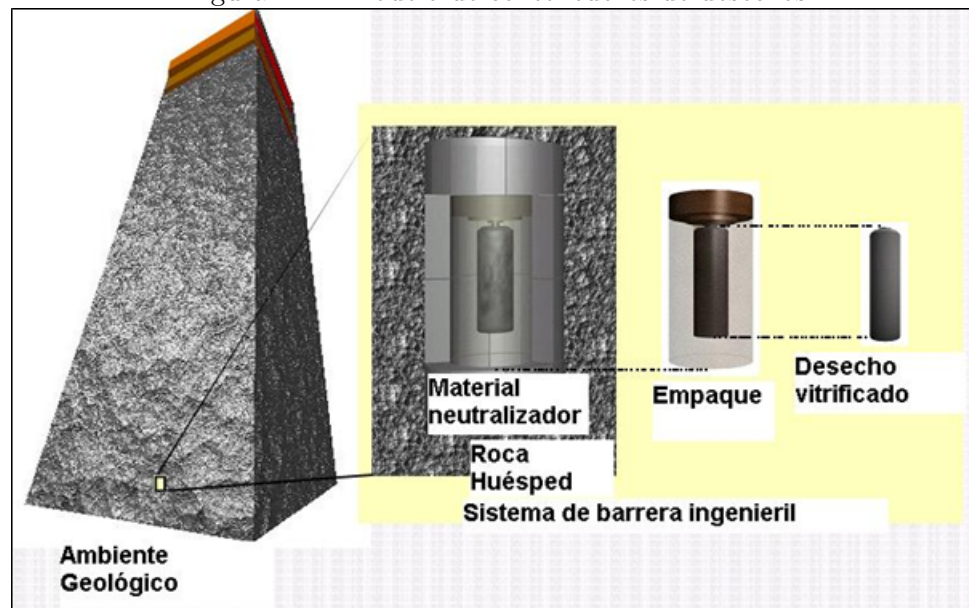
Para la disposición de los desechos radiactivos se consideran tres principios:

- **Concentrar y contener:** Se construyen depósitos donde son guardados los desechos de manera segura.
- **Diluir y dispersar:** Se diluye a niveles aceptable y luego es descargado al medio ambiente.
- **Retardar y decaer:** El desecho es almacenado para que disminuya su actividad a través del decaimiento de sus isótopos.

La primera es ampliamente aceptada ya que permite tener un mayor control sobre las consecuencias del vertido de los desechos. La segunda se utiliza en casos de baja actividad y es especialmente cuestionada por algunos sectores. La tercera es utilizada principalmente de manera provisoria.

En materia de contenedores se utiliza el modelo presentado en la figura 1.21, que permite aislar el desecho del medio ambiente a la vez de dar un emplazamiento seguro y estable.

Figura 1.21: Modelo de contenedores de desechos



Fuente: World nuclear association

Hemos visto que si bien no existe una solución definitiva al tema de los desechos radiactivos, en especial de aquellos que tienen actividad durante períodos que pueden llegar a durar varios siglos, la tecnología disponible permite manejarlos de manera controlada y confiable, hasta que la solución definitiva sea encontrada.

1.4. Opiniones de Expertos, Personajes Públicos y del Empresariado

Jorge Zanelli, Dr. en Física, miembro del Centro de Estudios Científicos, CECS; y presidente de la comisión que elaboró el informe “La opción Núcleo-Eléctrica en Chile”²⁴(Ver Anexo 3: Principales conclusiones del informe Zanelli).

“Hemos contribuido a que la energía nuclear de potencia se mire racionalmente y con objetividad...”

Entrevista publicada por la CCHEN

“El informe dice que la energía nuclear en el mundo es una opción válida, realista, práctica, hasta desde el punto de vista económico es interesante. Ahora, la pregunta es que si eso se puede replicar a información de calidad. Nuestro trabajo como comisión fue indagar en el mundo sobre este tema y ese recorrido no ha sido hecho por la sociedad. Todos deberían hacerlo porque es un problema que requiere amplia aceptación social, si no, fracasa. Es mejor que la decisión sea tomada con los pro y los contra, sabiendo que hay problemas con los desechos, con la radiación, que el material radiactivo es costoso y peligroso, etc. Mirando de frente el problema...”

Entrevista para Explora , programa del CONICYT.

“Todo esto puso en relieve la dependencia, fragilidad y vulnerabilidad de nuestro sistema energético y la necesidad de buscar soluciones en el largo plazo.”

Refiriéndose al aumento de la demanda energética, dependencia de combustible importados y problemas con el gas argentino. Discurso en Seminario Energía Nuclear AmCham, Expansiva y Libertad y Desarrollo

²⁴ Dado a conocer este 8 de noviembre de 2007 a la presidenta Michelle Bachelet.

“La energía nuclear es una actividad que compromete al país por una escala de tiempo mucho mayores que otros tipo de industrias, es una industria que compromete al país por un siglo al menos. . . una planta nuclear puede operar unos 60 años o 80 años. . . el proceso de poner en marcha puede tomar 15 años y después de eso está el manejo de los residuos y el almacenamiento seguro de los desechos que puede tomar varios siglos. . .”

Discurso en Seminario Energía Nuclear AmCham, Expansiva y Libertad y Desarrollo

“En la energía nuclear, rol del Estado es especial por cuanto la energía nuclear involucra riesgos especiales y cuidados especiales. . .”

Discurso en Seminario Energía Nuclear AmCham, Expansiva y Libertad y Desarrollo

Marcelo Tokman, Ministro de Energía.

“la Comisión tiene características muy particulares, con responsabilidades únicas a nivel nacional, relacionadas con la producción y utilización de la energía nuclear con fines pacíficos. . .”

En su visita a la CCHEN el 24 octubre 2008.

“El proceso de realización de estudios de factibilidad, regulatorios y ambientales, deberá tomar entre 12 y 15 años para materializarse en una planta de energía nuclear”

“Acá no es que estemos ni en condiciones ni que tampoco se requiera tomar una decisión en este momento. Sería una irresponsabilidad total, seguir avanzando, acercándonos al 2020, esperando que algunas de las otras políticas que estamos impulsando vayan a ser la solución mágica que nos vaya a asegurar la energía”

Conferencia sobre energía nuclear. Información extraída de Publimetro, 8 Julio 2008.

“El ministro de Energía chileno, Marcelo Tokman, señaló que en la actual coyuntura energética y con los proyectos de generación hidroeléctricos, a carbón y energías renovables no convencionales en estudio y desarrollo no sería necesario la puesta en operación de una central nuclear para generación eléctrica hasta por lo menos el 2025”

Extracto La Tercera, 8 de Julio 2008

Gonzalo Torres Oviedo, Ingeniero civil mecánico con postgrado en Energía Nuclear y Jefe del Departamento de Materiales Nucleares de Comisión Chilena de Energía Nuclear.

“Una central, la que sea, se demora 5 años en construirse, ¡en construirse!, previamente hay todo el proyecto de ingeniería, las aprobaciones, los estudios de sitio, son 2 o 3 años más, por parte baja, HidroAysén ya lleva más de 2 en sólo estudios preliminares de sitios, evaluaciones, que se yo, tiene q pasar por el paso de evaluación ambiental eso puede tomar otro año, o sea, un proyecto desde que se decide hasta q se pone en marcha toma 8 a 9 años y una central nuclear va tardar más, porque hay que formar gente, crear una infraestructura , así como que una central nuclear, en el momento en que decide. . . Chile decide vamos por una central nuclear son 12 años mínimo. . .”

Entrevista personal Octubre 2008.

Sara Larraín, directora de Chile Sustentable.

“ No creo que la opinión mayoritaria de los chilenos favorezca esta opción. Así lo vimos en las protestas de hace años contra las pruebas nucleares de Francia en el Pacífico. El combustible del futuro es el más seguro tanto para la estabilidad del suministro como para las personas, y este no es el caso. En general, las “sugerencias” de instalar un reactor se dirigen a las denominadas “regiones”, o sea, lo más lejos de la Santiago, así como las megacentrales eléctricas, las plantas de celulosa o proyectos mineros nocivos. Sucedería lo de siempre, se condenaría el desarrollo integrado de las “regiones” para favorecer la creciente demanda eléctrica de Santiago. Pero te reitero, no creo que sea la opinión mayoritaria. Ni siquiera en Francia, país con mayor desarrollo nuclear, es así”.

“...los datos son erróneos e incompletos. El Oko Institute de Alemania y la Agencia Internacional de Energía de Naciones Unidas concluyeron que si se considera el ciclo completo de producción de energía nuclear, incluida la minería del uranio y los procesos de enriquecimiento, transporte y desmantelamiento, ella genera una cantidad considerable de CO2 por KW/hora producido. Es más, si la producción se realiza a partir de minerales de bajo contenido en uranio, pueden generar más gases de efecto invernadero que una central térmica de ciclo combinado de igual potencia...”.

Refiriéndose a los datos entregados por el diario español El Mundo donde se señala lo siguiente: “Producir un kilovatio/hora con energía nuclear supone emitir a la atmósfera cero gramos de carbono. La energía eólica produce entre 5 y 10 gramos; la biomasa entre

10 y 20; el hidrógeno hasta 60 gramos; la solar entre 30 y 60 gramos, el gas natural entre 120 y 180 gramos; el petróleo entre 220 y 245 gramos y el carbón entre 260 y 355 gramos”.

”...en Chile, cualquier fuga de radioactividad que se traspasa al medio ambiente tras un terremoto es fatal para la población”...una planta nuclear es un tema mucho menos seguro que el resto de los tipos de energía, como los que provienen de los recursos naturales renovables”.

Lunes 4 Septiembre 2006 , El Mercurio en Internet

Sergio Bitar, ministro de Obras Públicas

“Existe un déficit serio de abastecimiento de energía y agua en el norte (de Chile) y no veo otra forma, estratégicamente hablando, que no sea con energía nuclear para desalinizar agua de mar, y con esto resolver los problemas de la agricultura y minería. . . Se debe afinar ahora una política nacional, luego de las conclusiones de la comisión Zanelli, y debe hacerse en los más altos niveles del Estado, el cual debe jugar un papel crucial. Los chilenos no debemos adentrarnos a tomar ninguna decisión si no tenemos una base propia de reflexión, de equipos, de gente, de políticas, de instituciones, de normas, que nos hagan avanzar a paso muy seguro. No podemos entrar a depender de terceros de manera improvisada...”

El Mercurio

Senador Hosaín Sabag Castillo, VII Región Norte

Respecto al hallazgo de presencia de uranio en la concesión de ”Cajones”, comuna de Santa Juana y ”Los Cardones” y ”Peralillo”, en Yumbel en la Región del Bío Bío, aclaró que: ”... en Chile el único poder comprador del uranio es el gobierno. Los particulares, como la empresa inglesa que tiene las concesiones de exploración, sólo lo pueden explorar, sondear y explotar, pero no comprar el mineral. Por lo mismo, se abren excelentes posibilidades para el desarrollo de la Nucleoelectricidad en el país”.

Capítulo 2

Evaluación de la Localización: Información y Recursos Necesarios

2.1. Aspectos sobre la seguridad

El principal temor para la sociedad sobre la energía nuclear surge por los riesgos que ésta tiene asociados ejemplificados por las bombas nucleares de la Segunda Guerra Mundial y accidentes como el de Chernóbyl. Sin lugar a dudas, con la evolución tecnológica y científica, las plantas nucleares actuales son mucho más seguras y además están reguladas desde 1957 por la Agencia Internacional de Energía Atómica, en adelante IAEA, que funciona además como un centro de cooperación mundial donde se promueve la seguridad y las tecnologías nucleares con fines pacíficos¹.

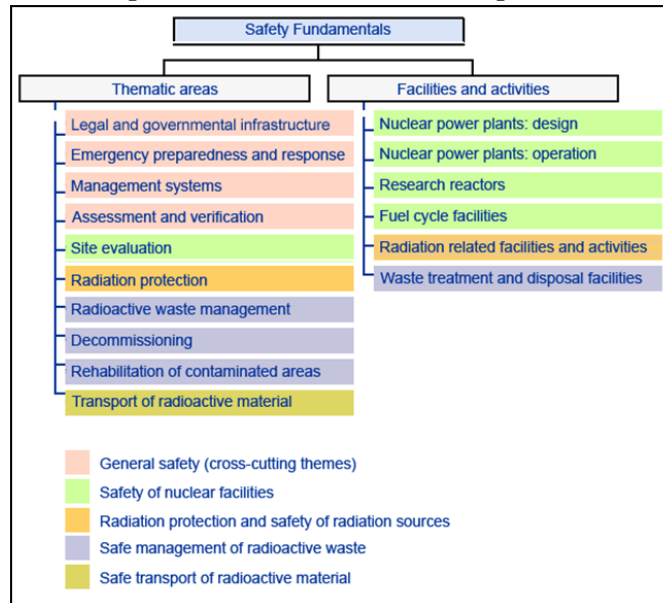
En este afán de promover la seguridad es que la IAEA ha diseñado diversas guías de seguridad para las distintas áreas temáticas y para instalaciones y actividades relacionadas con la energía nuclear.

Como se muestra en la figura 2.1 una de las áreas donde la IAEA ofrece guías de seguridad es en la evaluación de sitio, que es el tema de nuestro interés.

El proceso de implantación de una central nuclear en general se compone de una investigación de una gran región para seleccionar uno o más sitios candidatos seguida por una evaluación detallada de estos sitios candidatos. En esta última etapa es donde las guías de seguridad de sitio juegan un rol fundamental. Éstos establecen los requisitos y criterios para garantizar la seguridad en la evaluación de sitio para las instalaciones nucleares, en otras palabras están hechos para proteger a la población y al medio ambiente de las consecuencias de los posibles accidentes radiológicos y mantener la seguridad en condiciones normales de operación.

¹<http://www.iaea.org/About/index.html>

Figura 2.1: Fundamentos de Seguridad



Fuente: <http://www-ns.iaea.org/standards/>

El compendio de guías para la evaluación de sitio incluye un artículo sobre Requerimientos de seguridad y seis guías de seguridad que abarcan diferentes aspectos que deben ser considerados².

En los requerimientos de seguridad nos señalan que para elegir un sitio idóneo se deben considerar los siguientes puntos, que si en su evaluación determinan que el sitio es inaceptable y las deficiencias no se pueden suplir se considerará un lugar no apto:

- Los efectos de los acontecimientos externos, ya sea naturales o inducidos por el hombre, en la región donde se ubique la planta.
- Las características del sitio y su entorno que podrían influir en la transferencia a las personas y al medio ambiente de los materiales radiactivos que se expongan.
- La densidad y distribución de la población junto con otras características de la zona exterior de la planta, para definir las medidas de emergencia y la evaluación de riesgos.

Para realizar estas evaluaciones están las guías de seguridad, de las cuales nosotros hemos extraído los puntos más importantes destacando sobretodo la información y recursos necesarios que se requieren para dicha tarea³ y contrastándola con la situación de nuestro

²<http://www-ns.iaea.org/standards/documents/default.asp?sub=150>

³En general se refiere a recolección de diversos datos que deben ser analizados y estudiados bajo metodologías y estandarizaciones claras. Cabe destacar que la recopilación de datos que en estas guías

país en dichas materias, lo cual es presentado en cada sección en el apartado Información disponible en Chile. Como complemento a este último punto, presentamos en el anexo 4 las Organizaciones de nuestro país que se ven involucradas en los estudios de localización de una planta de energía nuclear.

2.1.1. Requisitos específicos para la evaluación

2.1.1.1. Los terremotos y fallas superficiales

En la evaluación del sitio en que se instalará una central nucleoelectrica es necesario considerar el riesgo que representan los fenómenos sísmicos ya que si bien la ingeniería dispone de medios para mitigar el efecto de las vibraciones causadas por un terremoto, no existe certeza sobre su efectividad en la mitigación de desplazamientos permanentes del suelo, como los ocasionados por las fallas superficiales, colapso del terreno, hundimiento progresivo y otros.

Las características geológicas, geofísicas y geotécnicas de la región que rodea la instalación deben ser investigadas, con el fin de poder crear una base de datos lo suficientemente homogénea que permita obtener los aspectos sísmicos relevantes que en el futuro pudiesen afectar directa o indirectamente a la construcción y operación de la planta, o ser un riesgo para la seguridad de ésta.

El tamaño de la base de datos necesaria, el grado de detalle de ésta, y la superficie que debe abarcar la investigación se determinará de acuerdo con la complejidad del ambiente sísmico de la zona en que se prospekte instalar la planta.

Como regla general deben realizarse esfuerzos por reducir el nivel de incertidumbre en cada etapa de la investigación, procurando recolectar información lo más detallada, relevante y confiable posible.

El sentido último del estudio será evaluar el riesgo de desplazamiento y probabilidad de falla del terreno en que se construirá la central de energía nuclear, lo que en gran medida será realizado en base a la opinión de expertos y su experiencia, construyendo modelos e hipótesis que serán contrastados con la información recolectada.

A. Información e investigación necesaria

Para realizar la evaluación de los aspectos sísmicos que pudiesen afectar la seguridad de la instalación de energía nuclear debe obtenerse una base de datos lo suficientemente extensa y detallada sobre las características que pueden influir en el riesgo sísmico del sitio, incluyendo no sólo datos geológicos, geofísicos, geotécnicos y sísmicos, sino que también

se describen debe continuar durante la vida útil de la planta, incluso durante el desmantelamiento y almacenamiento seguro.

cualquier otra información que afecte la caracterización del movimiento del terreno y la probabilidad de fallas superficiales.

La investigación debería ser llevada a cabo en cuatro escalas, regional, regional cercana, vecindad del sitio y sitio, con un detalle y cantidad de información creciente en cada escala, hasta llegar a estudios geotécnicos específicos del sitio.

Con el fin de dar consistencia a la presentación de la información los datos deben ser almacenados en un Sistema de información Geográfica (GIS) para poder hacer comparaciones, evaluaciones e interpretaciones de los resultados de manera efectiva.

1. Base de datos geológica, geofísica y geotécnica

- a) Investigación regional: El objetivo de obtener datos a nivel regional es el de obtener conocimiento sobre la configuración geodinámica general de la zona e identificar las características que puedan afectar el riesgo sísmico del sitio. Las más relevantes son aquellas que muestren potencial de desplazamiento y/o deformación del terreno, como las fallas capaces. Los datos pueden ser obtenidos de fuentes publicadas o no publicadas y deben ser presentados en mapas con una apropiada sección cruzada. El tamaño de la región relevante varía de acuerdo a las características sísmicas y tectónicas de la zona y puede ser asimétrica si existe una fuente significativa de terremotos. Su extensión radial suele ser de 150 Km. o más. En el caso particular de regiones con riesgo potencial de tsunamis debe considerarse distancias muy superiores.

Los datos usualmente son presentados en mapas con una escala de 1:500000 y con una apropiada sección cruzada.

Si existe información inadecuada o insuficiente para delinear la estructura sismogénicas, en término de localización, extensión y tasa de generación sísmica, se debe revisar la información y completar con nuevos datos geológicos y geofísicos. También se debe identificar el efecto superficial de terremotos pasados en el ambiente geológico-geomorfológico, esto es, realizar paleosismología en el sitio.

2. Investigación regional cercana: Esta investigación busca definir las características sismotectónicas del sector sobre la base de información más detallada que la utilizada en el estudio regional. También busca determinar los últimos movimientos de las fallas y para las fallas más importantes en la determinación del riesgo de la instalación, el monto y naturaleza del desplazamiento, tasas de actividad y evidencias de segmentación.

La información de datos publicados y no publicados sobre la región cercana debe complementarse con investigaciones específicas que deberían incluir típicamente la

definición de la estratigrafía, la estructura geológica y la historia tectónica del sector abarcado en esta etapa.

Debe realizarse un datado de antigüedad y además del mapeo de campo se pueden utilizar otras fuentes de datos como investigaciones geofísicas (reflexión y refracción sísmica, gravimetría, y técnicas eléctricas y magnéticas) para caracterizar espacialmente estructuras relevantes en el análisis del riesgo para el sitio.

Se deben obtener datos de superficie derivados de estudios de formaciones Cuaternarias, como estudios escalonados y sedimentarios, entre otros. También se pueden utilizar imágenes satelitales para éste propósito.

Para estudiar la tasa de actividad tectónica y su tipo se pueden utilizar métodos como la tecnología de posicionamiento global y datos obtenidos de investigaciones con interferómetros.

La investigación debe ser suficientemente detallada para que cada aspecto relevante de la geología y geomorfología pueda ser incluido en un modelo razonable de evolución geológica reciente del área.

Se debe considerar no menos de 25 KM. y los datos deberán ser típicamente presentados en una escala de 1:50000 con una adecuada secciones cruzadas.

3. Investigación de vecindad del sitio: Además de recolectar datos aún más detallados para esta pequeña área, el objetivo de este análisis es definir con gran detalle la historia neotectónica de fallas, especialmente para determinar el potencial de fallas superficiales en el sitio, e identificar el potencial de inestabilidad geológica en el área.

Usualmente incluye el mapeo geomorfológico-geológico, prospección geofísica y perforación de la tierra. Con esos estudios se puede obtener un mapa geológico, la antigüedad, tipo y cantidad de desplazamiento de las fallas ubicadas en el área y la identificación y caracterización de riesgos inducidos por fenómenos naturales (por ejemplo hundimiento y deslizamiento de tierra) y actividades humanas, en especial el uso indiscriminado de la tierra o la extracción y/o inyección de fluidos en el suelo.

Esta escala abarca cerca de 5 Km. De radio y los datos son presentados en mapas a una escala 1:5000 con las apropiadas secciones cruzadas.

4. Investigación de la zona del sitio: El objetivo principal del estudio de la zona del sitio es obtener conocimiento detallado del potencial desplazamiento permanente y entregar información sobre las propiedades dinámicas de los materiales de los cimientos (como las velocidades de las ondas Primarias y Secundarias)

La base de datos debe ser desarrollada por medio de detallados estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, complementados con testeos in situ y en laboratorio.

Específicamente se deben realizar las siguientes investigaciones en la zona del sitio:

- a) Investigaciones geológicas y geotécnicas: Investigaciones utilizando excavaciones y perforaciones, técnicas geofísicas y pruebas de laboratorio conducidas a definir la estratigrafía y estructura del área del sitio y a determinar el grosor, la densidad, la profundidad el buzamiento y las propiedades estáticas y dinámicas de las diferentes capas o estratos que forman el subsuelo que requieren los modelos de ingeniería
- b) Investigaciones hidrogeológicas: Investigaciones con perforaciones que permitan definir la geometría, las propiedades físicas y químicas, y el comportamiento estacionario (transmisividad y recarga) de todos los acuíferos del área, con el propósito específico de determinar como interactuarían con la instalación.
- c) Investigaciones de los efectos del sitio: Debe evaluarse el comportamiento dinámico del suelo y la roca, utilizando datos históricos e instrumentales.

Toda la información conseguida debe ser complementada con el resto de los estudios mencionados a lo largo de este documento con el fin de incorporar el efecto que otros fenómenos puede tener sobre el suelo de la planta.

La información debe ser presentada en un mapa a una escala de 1:500 con las secciones cruzadas adecuadas.

B. Base de datos sismológica

Debe ser construida una base de datos sismológica que incluya tanto información histórica, instrumental y no-instrumental, como datos recolectados de estudios específicos en el sitio de la instalación.

1. Base de datos histórica: Es necesario recolectar datos sismológicos no-instrumentales lo más antiguos posible, incluyendo aquellos que puedan ser obtenidos con técnicas paleosísmicas sobre terremotos históricos. Debería incluirse la siguiente información de manera lo más extensa posible:
 - Fecha y hora del evento
 - Localización del epicentro macrosísmico
 - Profundidad focal estimada
 - Magnitud estimada

- Intensidad máxima, y de ser diferente, intensidad máxima en el epicentro macrosísmico
 - Contornos isosísmicos
 - Incertidumbre estimada sobre los parámetros
 - Intensidad del terremoto en el sitio, con cualquier detalle disponible sobre su efecto en el suelo
 - Una evaluación sobre la calidad y cantidad de datos sobre los cuáles son estimados los parámetros en estudio.
2. Datos instrumentales sobre terremotos: Deben ser recolectados datos instrumentales sobre terremotos que incluyan los siguientes datos:

- Momento de origen
- Localización de Epicentro e Hipocentro
- Todas magnitudes determinables, en diferentes escalas, e información sobre el momento sísmico y el stress drop.
- Dimensiones y geometría de los sismos preliminares y las replicas
- Otra información útil para entender el régimen sismotectónico tales como el mecanismo focal y otras fuentes de parámetros.
- Estimaciones sobre la incertidumbre en cada una de las variables
- Detalles macrosísmicos

Una vez compilada una base de datos sobre las variables relevantes sobre terremotos, se debe evaluar su confiabilidad y completitud.

3. Datos instrumentales específicos del sitio: Para recolectar datos con suficiente detalle sobre potenciales fuentes de terremotos usualmente se instala una red de sismógrafos que cuenten con la capacidad de registrar microsismos. El período de monitoreo necesario para caracterizar el sitio puede ser de varios años de registro, siendo superior el tiempo requerido para zonas de baja sismicidad que el requeridos para zonas de una mayor actividad. También es necesario instalar acelerógrafos permanentes capaces de captar eventos de distinta magnitud.
4. Todos los datos obtenidos en el sitio deben ser cuidadosamente analizados, conectándolos con los estudios realizados para la región cercana.
5. Se debe estudiar la dinámica del suelo, con el fin de derivar el modelo de atenuación adecuado.

C. Construcción de un modelo regional sismotectónico

Una vez que la base de datos está completa se debe diseñar un Modelo Regional Sismotectónico que incluya de manera coherente la información obtenida en los diferentes estudios y permita comenzar con la derivación de los niveles de riesgo presentes en el sitio en estudio. Es importante considerar todas las interpretaciones sismotectónicas disponibles en la literatura en el diseño del modelo, integrando elementos geológicos, sismológicos y geofísicos.

Con la información almacenada en la base de datos obtenidos se debería obtener un modelo con dos tipos de fuentes sismogénicas:

1. Estructuras sismogénicas: Se identifican en base a información geológica, geofísica y sismológica que indique directa o indirectamente que las estructuras han sido fuente de terremotos bajo las condiciones tectónicas actuales. Es particularmente importante la correlación de información sísmica tanto instrumental como no instrumental con los rasgos geológicos y geofísicos en la identificación de las estructuras sismogénicas.

Para las estructuras sismogénicas identificadas como posible fuente de riesgo sismológico se deben determinar sus características como las dimensiones de la estructura, la magnitud y dirección del desplazamiento, terremoto máximo histórico, datos paleosismológicos, datos de terremotos y comparaciones con estructuras similares sobre las cuales se cuente con datos históricos.

Al tener información geológica y sísmica suficiente como para estimar las dimensiones de la máxima ruptura y/o desplazamiento de futuros terremotos, se puede usar relaciones empíricas directas para evaluar la máxima magnitud potencial.

Un segundo enfoque que se utiliza al no tener información que tenga el detalle adecuado para buscar la magnitud máxima potencial asociado a una estructura se basa en estimarla en base a sus dimensiones totales. Se utiliza una fracción del largo total de la estructura que puede moverse en un terremoto.

Otro enfoque posible para el estudio de las estructuras sismogénicas es un análisis estadístico de magnitud-frecuencia para los sismos asociados con una estructura particular. Se asume una asociación entre la estructura y los datos disponibles.

En los tres enfoques se debe tener claro el carácter incierto de la estimación de la magnitud máxima potencial de un terremoto, debido a la propia naturaleza del fenómeno estudiado, lo que debe ser detalladamente descrito.

2. Zonas de sismicidad difusa

Para representar la sismicidad difusa con el fin de evaluar el riesgo sísmico de una instalación nuclear se pueden definir provincias sismotectónicas que pueden ser asum-

idas como zonas que encierran un potencial sísmico igual, o de manera alternativa, pueden tener una distribución no uniforme, si es que los datos proveen suficiente información para apoyar ese supuesto.

Diferencias significativas en las tasas de sismicidad puede sugerir condiciones tectónicas diferentes y puede ser usado para definir fronteras. Diferencias significativas en la profundidad de hipocentros puede ser utilizada para diferenciar entre zonas.

El terremoto máximo potencial asociado no asociado con estructuras sismogénicas identificadas debe ser evaluado sobre la base de datos históricos y las características sismotectónicas de la zona.

D. Potencial de falla superficial en el sitio

Debe ser evaluada la posibilidad de falla superficial (potencial de falla) que pueda aumentar el riesgo al que estaría expuesta la planta.

Se debe considerar que la falla puede surgir sin una liberación importante de energía sísmica, y puede ser inducida por diversas causas, como por ejemplo ambientes de actividad tectónica debido a volcanes o incluso por grandes extracciones artificiales de agua u otro fluido subterráneo.

1. Fallas potencial⁴

La base para definir si una falla tiene potencial de tener un desplazamiento son los datos obtenidos anteriormente y el modelo sismotectónico desarrollado.

Sobre la base de la información geológica, geofísica, geodésica o sismológica, una falla puede ser considerada potencial:

- Si muestra evidencias de movimientos de naturaleza recurrente, con lo cual es razonable inferir que ocurrirán futuros movimientos en o cerca de la superficie.
- Si una relación estructural con una falla potencial conocida ha sido demostrada, tal que el movimiento de una falla puede causar movimiento en otra, en o cerca de la superficie.
- Si el terremoto máximo potencial asociado con una estructura sismogénica, es suficientemente grande, y a cuya profundidad es razonable inferir que, en las configuraciones geodinámicas de la planta, puede ocurrir un movimiento en o cerca de la planta.

⁴falla potencial: Falla que tiene un significativo potencial de desplazamiento relativo en o cerca de la superficie de la tierra.

2. Investigaciones necesarias para determinar el potencial de falla

- Se debe poseer suficiente información superficial como subterránea de la región, la región cercana, la vecindad del sitio y el sitio como para mostrar la ausencia de fallas en la zona, o si existiese alguna, para describir la dirección, extensión e historia de movimientos en ella y para estimar la antigüedad del más reciente de ellos.
- Especial atención se debe tener con aquellas características geomorfológicas y geológicas que son particularmente útiles para distinguir fallas y estimar la antigüedad de los movimientos.
- Cuando se sospecha de la existencia de una falla se debe realizar investigaciones a nivel de vecindad del sitio entre las cuáles se incluyen un detallado mapeo geomorfológico, análisis topográfico, investigación geofísica, excavaciones, perforaciones, datado de sedimento de rocas en la falla, investigaciones sismológicas locales y cualquier otra técnica que permita precisar cuándo sucedió el último movimiento.
- Se debe considerar la posibilidad de que fallas que no registran movimientos recientes puedan reactivarse por inyección o extracción de fluidos, la carga de un depósito superficial o subterráneo u otro fenómeno.
- Cuando se demuestra de manera confiable que existe una falla con el potencial de afectar la seguridad de la planta en el sitio, se debe reevaluar la factibilidad de la construcción y operación en el lugar, y de ser necesario buscar otro sitio.

En cada etapa del proceso de investigación, modelamiento y evaluación se debe velar por el cumplimiento de un programa de calidad que permita dar confiabilidad a las conclusiones, acompañado de un suficiente respaldo por parte de profesionales con conocimiento experto y larga experiencia en la materia.

E. Información disponible en Chile

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica y donde se han producido los mayores eventos en el mundo por lo que deben ser investigadas a fondo las implicaciones que esto va a tener sobre la decisión de emplazamiento y el diseño de una eventual planta nucleoelectrica.

En el capítulo se mencionó que los principales estudios necesarios para estudiar el riesgo sísmico asociado a un sitio para una instalación nuclear son de tipo geológico, geofísico, geotécnicos y relacionados, además de la incorporación de información histórica, tanto

instrumental como no instrumental, de los eventos sísmicos ocurridos en las distintas escalas territoriales a estudiar.

Los organismos que manejan bases con información necesaria para los estudios sismológicos son principalmente dos:

1. SERNAGEOMIN

Produce productos geológicos que puedes ayudar en las primeras etapas del análisis, entre los que se cuentan la Carta Geológica de Chile y el mapa geológico, que muestra las principales estructuras geológicas existentes en cada zona. Combina las disciplinas de la geología regional, geología estructural, petrología, geoquímica y bioestratigrafía.

También cuenta con información Geofísica que complementa a la Carta Geológica de Chile como la elaboración de la Carta Magnética y Gravimétrica de Chile, además de mapas de microzonificación sísmica. En este punto es importante señalar que la institución cuenta con una serie de sensores remotos con los que se pueden realizar diferentes investigaciones o contraste de teorías (producen imágenes que de acuerdo con sus características las más utilizadas son: LANDSAT, ASTER, GEOSCAN, SPOT, IKONOS, QUICKBIRD, JERS1, EROS, RADARSAT, SAR, ERS-1, Fotografías aéreas (pancromática, color e infrarroja).

Sin duda la información más relevante para el presente tema son los estudios de peligro sismológico, que se representan en mapas que clasifican el territorio de acuerdo con la intensidad de los movimientos que alcanzaría el terreno durante un determinado sismo, además de mostrar las zonas que podrían verse afectadas por licuefacción. También se identifican y caracterizan zonas de falla que podrían generar sismos de importancia.

2. Servicio Sismológico de Chile

Cuenta con información histórica de sismos ocurridos en el territorio nacional, además de generar información constante con la red instalada para tal efecto a lo largo del país.

Genera registros constantes de los eventos que ocurren a lo largo del tiempo, con información como latitud, longitud, profundidad e intensidad.

Chile se encuentra en buen pie para evaluar los riesgos sísmicos que enfrentaría la instalación de una central nuclear, ya que existe una amplia gama de información relevante que puede ser explotada, en especial en las etapas regional, regional cercana y quizás de vecindad del sitio, ya que la investigación del sitio posiblemente deban tener un nivel de detalle

superior a los datos disponibles, con pruebas de laboratorio e instrumental específico para el objetivo deseado.

Los modelos deben ser especificados para el sitio, o los sitios prospectados con el fin de incorporar las características físicas del suelo, con el potencial de falla y movimiento superficial potencial adecuado a los rasgos concretos encontrados según el modelo sismotectónico desarrollado.

2.1.1.2. Los fenómenos meteorológicos

Los fenómenos meteorológicos que se deben analizar se dividen en dos grandes grupos: valores extremos y fenómenos extraños. En el primer grupo se incluye el estudio de parámetros extremos de las siguientes variables que son medidas habitualmente a través de una red de estaciones fijas: vientos, precipitaciones, nieve, temperaturas, nivel del agua del mar. En el segundo los tornados, ciclones tropicales y rayos, es decir fenómenos de poca ocurrencia y/o que son casi imposibles de medir. Se recomienda evaluar además los efectos de las ventiscas, tormentas de polvo y arena, sequía, granizo y hielo y los cambios climático incluyendo lo relacionado con el calentamiento global.

Todo esto es útil principalmente para determinar las consideraciones que se deben tener en el diseño de las plantas nucleares a modo de prevenir cualquier falla que pueda haber en estas por los peligros del ambiente climatológico donde se encuentre.

A. Valores extremos de las variables meteorológicas

1. Fuentes de datos

Los datos necesarios deben ser tomados en condiciones normales y cubrir un periodo mínimo de treinta años, de no tener todos los datos necesarios se debe recurrir al llamado método de renovación que consiste en aumentar el tamaño de la muestra en lugar de poner un único valor máximo por año para compensar la mayor incertidumbre, es decir, agregar por ejemplo, el segundo y tercer valor máximo. Para las variables principales: viento, temperatura y precipitaciones, existen datos muy antiguos, que sin lugar a dudas sobrepasan los treinta años, incluso algunos sobrepasan los cien años⁵.

Si los datos no están disponibles para la localización exacta que se ha escogido se deben recoger de subestaciones de la región, junto con esto debe procesarse la información de estaciones donde la mayoría de las variables son muy similares a las que suceden en el lugar seleccionado o la de estaciones meteorológicas que comparten la misma climatología.

⁵Fuente: Juan San Martín, bibliotecario de la Dirección Meteorológica de Chile

En el informe de análisis de datos se debe incorporar una descripción de la estación meteorológica que realizó esta actividad debido a que no todas las mediciones siguen los mismos procedimientos. Esta descripción debe incluir tipos de dispositivos, calibración, calidad y coherencia de los registros, su ubicación geográfica y sus condiciones ambientales.

El procedimiento general para determinar el peligro de una variable meteorológica extrema es el siguiente:

- a) Un estudio realizado por el representante de las series de datos disponibles para la región bajo análisis, en este caso la Dirección Meteorológica de Chile y el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, y una evaluación de su calidad (exhaustividad y fiabilidad).
- b) La selección de la distribución de probabilidad estadística más adecuada para el conjunto de datos.
- c) El tratamiento de los datos para evaluar momentos de la función de distribución de la variable en estudio (valor esperado, desviación estándar y otros de ser necesario), a partir de la cual pueden ser derivados la media del intervalo de recurrencia (MRI) y los valores asociados a los límites de confianza. Se deben tener en cuenta la posible falta de estacionalidad y tener en cuenta los límites físicos de la variable de interés.

2. Vientos

Se busca medir la velocidad máxima del viento, omitiendo su orientación. Los datos deben ser normalizados a un promedio de periodos de tiempo (3 segundos, 1 minuto o 10 minutos), a un estándar de altura (10 metros sobre el nivel del suelo) y corregidos por la topografía del lugar. Cuando se realice el diseño se deben tener los valores de velocidad del viento de un periodo de tiempo que sea crítico para este fin. Si se considera la orientación del viento se deben agrupar los datos por secciones.

Los vientos fuertes producidos por fenómenos meteorológicos⁶ se deben analizar por separado como variables aleatorias.

3. Precipitaciones

Se debe medir la cantidad de agua caída durante diferentes periodos de tiempo sin discriminar entre precipitaciones sólidas o líquidas. El periodo máximo es de 24 horas.

⁶Estos fenómenos pueden ser: sistemas de presión extendido (EPSs), nubes cumulonimbus (que suelen producir lluvias intensas y tormentas eléctricas), föhn (efecto donde las montañas obligan al aire a subir condensando el vapor de agua, generando lluvias en un lado y el descenso rápido del aire seco en el otro), corrientes inducidas por gravedad y otros fenómenos.

Además se deben considerar, la intensidad y duración de las precipitaciones a través de una curva y las características meteorológicas y topográficas que incidan en las fuertes lluvias y en su área crítica de drenaje.

4. Nieve

Se busca evaluar la carga de nieve, medida en términos de una profundidad equivalente de agua, sobre una estructura, la cual depende de la profundidad de la nieve caída y de la densidad de los copos. El estudio debe considerar la distribución de las nevadas y su entorno topográfico.

5. Temperatura

Se refiere a los datos de temperaturas mínimas y máximas registradas. Se deben incluir los conjuntos ampliados (segunda y tercera temperatura máxima/mínima por cada año) y los datos sobre la persistencia (duración de dicha temperatura).

6. Nivel del mar

La información para este análisis incluye el nivel medio del mar, medido por mareógrafos, y los valores extremos de las tempestades y de la altura de las olas. En los datos históricos se debe tener la precaución de reconocer cuando la zona costera ha sufrido cambios ya sea naturales o realizados por el hombre, como por ejemplo la construcción de muelles. Los datos deben ser contrastados con las variables que influyen el nivel del mar como el viento y la presión.

B. Fenómenos meteorológicos extraños

1. Fuentes de datos

Debido al carácter destructivo de estos fenómenos y a su ubicación incierta y variable, es extremadamente difícil realizar una medición de su magnitud. Los datos que se necesitan son reunidos sistemáticamente por organizaciones especializadas y datos históricos. Lo que se mide por lo general es su intensidad, ya sea en una escala de daños causados o en factores físicos como la velocidad del viento. Es importante la recopilación y análisis de la información que aparece inmediatamente después de ocurrido un fenómeno ya que con esto se pueden construir modelos conceptuales que faciliten la tarea de predicción entre otras cosas.

El procedimiento general para determinar el peligro de un fenómeno meteorológico es el siguiente:

- a) Se evalúa el potencial en la región para cada fenómeno. Si hay un potencial, se evalúa la climatología regional y se determina la intensidad y la frecuencia de ocurrencia del fenómeno en cuestión.
- b) Se identifican los parámetros físicos asociados con diferentes intensidades del fenómeno.
- c) Se determina la probabilidad de ocurrencia de cada fenómeno en el sitio específico como una función de intensidad del fenómeno, o se construye un modelo apropiado para el fenómeno en la región.
- d) El diseño base del fenómeno corresponde a la probabilidad específica de exceder el valor evaluado.

2. Tornados

Dado el escenario de nuestro país, que se analiza con más detalle en el punto C de este apartado, es necesario buscar y recopilar toda la información existente, clasificarla y analizarla principalmente en aspectos de intensidad (escala Fujita) y de magnitud de daños⁷ para establecer la probabilidad anual de que un tornado en una región específica supere una velocidad determinada. Con esta información se debe crear un “catálogo de tornados” que además de lo ya mencionado incluya la longitud, ancho, y dirección de la trayectoria de éstos y definir un “tornado modelo” que permita evaluar otros parámetros como la velocidad de rotación, el radio de la velocidad máxima y la caída de presión.

3. Ciclones Tropicales

En Chile no existen los ciclones tropicales, también conocidos como huracanes o tifones, debido a la baja temperatura de las aguas marinas que nos rodean; la calidez de las aguas es una condición necesaria para la formación de este fenómeno. En consideración de lo anterior, no es necesario realizar estudios sobre este tema en nuestro país.

4. Rayos

Los rayos son fenómenos difíciles de medir e imposibles predecir pero con un estudio de los datos se pueden definir zonas de mayor probabilidad de ocurrencia incluyendo las estaciones del año y las horas del día más probables; una herramienta utilizada para cumplir con este propósito es el isokeraunic map.



















⁷Sobretudo en lo que pueda concernir a las construcciones para efectos de diseño como el efecto de los golpes del viento, la caída de presión que surge después y cualquier otro posible impacto.

C. Información disponible en Chile El organismo encargado de recopilar los datos de todas las variables meteorológicas, exceptuando el nivel del agua marina, es la Dirección Meteorológica de Chile. El Servicio Meteorológico de la Armada de Chile publica en su página web información sobre todo lo relacionado con el nivel del mar, lo que incluye los vientos y el tamaño de las olas, sin embargo, no son ellos quienes manejan esa información, si no que es el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) a través del Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos (CENDHOC). Además hay otras instituciones que colaboran con la recolección de datos, y que después se los entregan al Centro de Análisis de la Dirección Meteorológica de Chile como por ejemplo algunos retenes de carabineros, la Dirección General de Aguas, entre otros.

Luego de escogida la macro localización, uno de los pasos a seguir es reconocer las estaciones que se encuentran en la zona o cerca de ella y averiguar con exactitud cual es el tipo de información que proporcionan y desde ese punto determinar la necesidad de recursos físicos y humanos que se requerirían para compensar las posibles faltas todo esto, teniendo siempre en consideración la climatología del lugar que podría hacer innecesarios uno o más estudios de los que exige la IAEA.

A modo de colaborar con una de las etapas descritas, presentamos las tablas siguientes; la primera (2.1) nos muestra en términos sencillos las variables meteorológicas que mide cada tipo de estación meteorológica y la segunda (2.2) la cantidad total de estaciones por región y el total país. Para tener mayor detalle sobre esto, es recomendable consultar el Catastro de estaciones meteorológicas de nuestro país, que a pesar de ser del 2000 contiene actualizaciones posteriores a esa fecha gracias a personas que se esmeran por entregar a mejor información.

Cuadro 2.1: Estaciones meteorológicas chilenas según las variables que mide

Estación	Variables meteorológicas que mide			Cantidad
	Vientos	Precipitaciones	Temperatura	
Pluviométrica				149
Termopluviométrica				39
Climatológicas				12
Agrometeorológica				68
Aeronáutica				3
Sinóptica				3
Sinóptica-Aeronáutica				31
Ozonométrica				2
Climatológica automática				3
Total de estaciones por variable Meteorológica	37	308	159	
Total de estaciones Meteorológicas en Chile				310

Elaborado en base a Catastro de Estaciones Meteorológicas año 2000.

Cuadro 2.2: Estaciones por región

Región	Nº de estaciones
I	16
II	6
III	12
IV	39
V	42
VI	39
VII	31
VIII	26
IX	21
X	28
XI	8
XII	11
RM	33
Total país	312

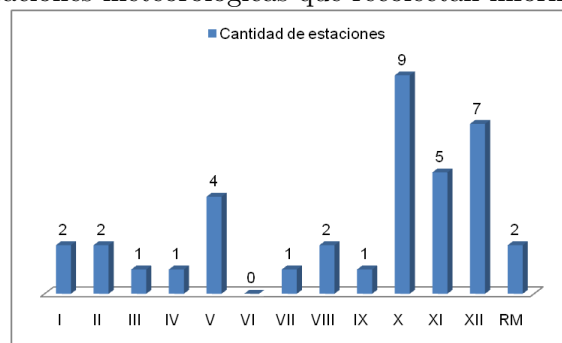
Elaborado en base a Catastro de Estaciones Meteorológicas año 2000.

Analizando esta información con más detalle, para el análisis de cada variable meteorológica, tenemos:

1. Vientos:

Para medir la velocidad del viento, la Dirección Meteorológica de Chile cuenta con Veletas y Anemómetros convencionales y eléctricos cuya medición es en nudos y kilómetros. Existen en total 37 estaciones meteorológicas que recogen datos del viento en nuestro país distribuidas como se muestra en la figura 2.2

Figura 2.2: Estaciones meteorológicas que recolectan información del viento

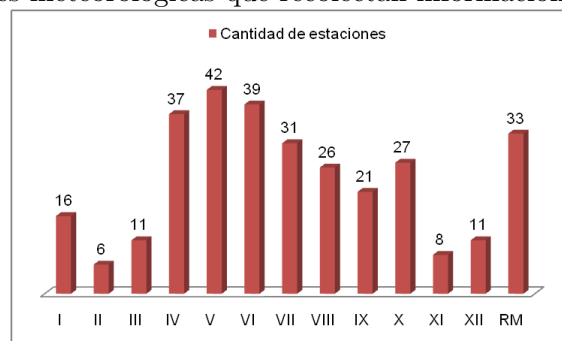


Elaborado en base a Catastro de Estaciones Meteorológicas año 2000.

2. Precipitaciones:

El instrumento recomendado para realizar las mediciones de esta variable es un pluviómetro continuo similar a un cubo para recopilar el agua caída, instrumento que posee la Dirección Meteorológica de Chile, en detalle, esta institución posee pluviómetros y pluviógrafos convencionales que miden en milímetros además de estaciones automáticas. Las estaciones meteorológicas que miden las precipitaciones son 308. La distribución regional de éstas se muestra en la figura 2.3

Figura 2.3: Estaciones meteorológicas que recolectan información de las precipitaciones



Elaborado en base a Catastro de Estaciones Meteorológicas año 2000.

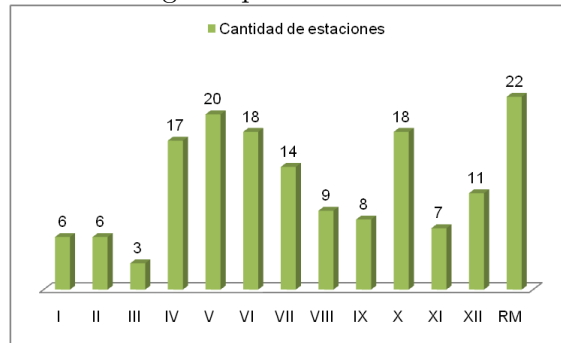
3. Nieve:

En nuestro país no existe ningún organismo que tome este tipo de mediciones⁸, por lo que, de ser necesario⁹, se deberían destinar recursos para cumplir con los estudios necesarios.

4. Temperatura:

Los informes de temperatura, incluyendo los pronósticos, se entregan a diario para todos los chilenos, es por esto que tenemos la certeza de que la Dirección Meteorológica de Chile cuenta con los instrumentos necesarios, estos son cobertizos meteorológicos que contienen un Higrotermógrafo que entrega la temperatura instantánea, el máximo y el mínimo. Las estaciones, a lo largo de todo el país, que recogen información de este tipo alcanzan las 159. Podemos ver esto en la figura 2.4

Figura 2.4: Estaciones meteorológicas que recolectan información de las temperaturas



Elaborado en base a Catastro de Estaciones Meteorológicas año 2000.

5. Nivel del mar:

La información se obtiene de observaciones realizadas en estaciones satelitales automáticas del SHOA ubicadas a lo largo de todo el país. Las principales estaciones, que cuentan con plataforma digital satelital, son:

- Arica
- Iquique
- Antofagasta
- Isla de Pascua
- Isla San Félix

⁸Fuente: Juan San Martín, bibliotecario de la Dirección Meteorológica de Chile.

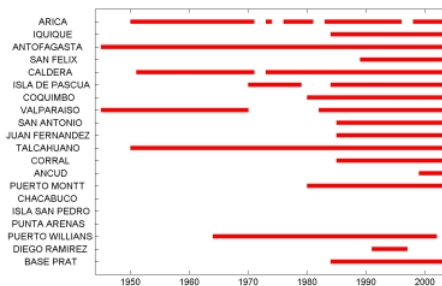
⁹Necesario según la macro localización escogida, es decir, si en esa área preseleccionada existen nevazones.

- Caldera
- Coquimbo
- Valparaíso
- Isla Juan Fernández
- San Antonio
- Talcachuanu
- Corral
- Puerto Montt
- Ancud
- Puerto Chacabuco
- San Pedro
- Punta Arenas
- Puerto Williams

En el sitio web del SHOA aparece una sección llamada mareas donde entregan datos en línea sobre el nivel del mar en distintos lugares de nuestro país desde el año 2004, estos lugares son: Arica, Iquique, Antofagasta, Caldera, Isla de Pascua, Coquimbo, Valparaíso, Isla Juan Fernández, San Antonio, Talcahuano, Corral, Puerto Montt, Ancud, Puerto Chacabuco, Angostura Inglesa, Punta Arenas, Punta Delgada, Bahía Orange, Puerto Williams, Base Pratt y Covadonga.

Esto no quiere decir que estén sólo desde ese año, es más, en el siguiente gráfico (figura 2.5) se muestran las mediciones realizadas desde 1950 hasta el 2000.

Figura 2.5: Períodos de medición de alturas horarias del nivel del mar en las estaciones costeras.



Fuente: SHOA, Base de datos alturas horarias del nivel y temperatura superficial del mar, Tabla 1.

6. Tornados:

La información que existe sobre los tornados en nuestro país es muy poca y se refiere principalmente a asuntos teóricos (cómo se forman, qué hacer en caso de un tornado, etc.) más que en hechos históricos. Los tornados en Chile son muy extraños y débiles, de una intensidad de F0 a F1 en la escala de Fujita:

- F0: vientos de 60 a 117 KM/Hr cuyos daños se producen en chimeneas, antenas de radio y televisión, se quiebran las ramas de los árboles y algunos son derribados.
- F1: vientos de 117 a 181 KM/Hr que producen roturas de vidrios de ventanas y puertas, desprendimiento de las coberturas, tejas o chapas protectoras de los techos, los árboles son arrancados de raíz o se quiebran y los automóviles en movimiento son desplazados fuera de su ruta.

Una de las fuentes confiables es la página web Atmósfera del departamento de Geofísica de la Universidad de Chile que nos indica, en su apartado sobre los tornados, que los fenómenos documentados se localizaron en la zona centro-sur¹⁰, ejemplo de ello son los tornados ocurridos en la octava región, Concepción (mayo 1934), Lota (junio 2007) y Ciudad de Arauco (junio 2007)¹¹, sin embargo, otras fuentes, medios de prensa, foros especializados, entre otros, nos informan sobre tornados en otras zonas de nuestro país como los acontecidos en el norte, Iquique (junio, 1929) y Antofagasta (julio, 1954)¹² y en el extremo sur, cerca de Chile Chico (octubre del 2004)¹³. Un miembro de un foro de meteorología cuenta que antes de 1999 había máximo un tornado al año y que a partir de ese año la frecuencia aumentó a dos, con excepción del año 2002 donde se registraron tres de estos fenómenos¹⁴.

7. Rayos

Nuestro territorio tiene una baja frecuencia de tormentas eléctricas, estas no sobrepasan unas pocas decenas, especialmente en Septiembre. Los principales daños que causan en nuestro país estos fenómenos son a los aparatos eléctricos¹⁵.

Aparentemente la Dirección Meteorológica de Chile cuenta con estudios sobre estos fenómenos, dadas las estadísticas presentadas en el primer párrafo, sin embargo no tenemos certeza de ello; la información no está disponible para el público general.

¹⁰http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/temas_02.html

¹¹http://www.geofisica.udec.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=46&Itemid=2, http://www.chile.com/tpl/articulo/detalle/ver.tpl?cod_articulo=89990, y diversos medios de prensa (Chilevisión, La Nación, TVN, entre otros)

¹²<http://www.medynet.com/usuarios/jraguilar/tornados%20y%20terremotos.pdf>, entre otros.

¹³<http://noticiasapolunimbus.blogcindario.com/2004/12/00003.html>

¹⁴<http://www.tutiempo.net/foros/index.php?action=vthread&forum=1&topic=585>

¹⁵<http://www.angelfire.com/co2/elbows2/rayos.html>

El estudio de éstos fenómenos en nuestro país es casi nulo, no existe ninguna institución confiable que recoja y analice los datos de éstos fenómenos debido a la rareza de éstos. La incidencia de este desconocimiento en el estudio de localización dependerá de las características del macro lugar en primera instancia y del análisis del micro lugar en una posterior.

2.1.1.3. Inundaciones

Una central nuclear puede verse profundamente afectada por las inundaciones es por esto que en la evaluación de localización se debe determinar el riesgo por inundación a causa de diferentes fenómenos como tormentas, tsunamis, eventos meteorológicos extremos, desbordes de fuentes hidrológicas cercanas o cualquier otro evento que pudiera afectar la seguridad de la instalación y se debe determinar la probabilidad de inundación máxima para cada fenómeno y así garantizar la seguridad de la instalación frente al riesgo de que esto ocurra.

Los efectos de una inundación pueden ser variados como generación de problemas con la seguridad de los sistemas en el suministro de energía de emergencia o perder la conexión externa de la red eléctrica, problemas con el sistema de eliminación de calor. También pueden generarse problemas estructurales producto de la presión del agua en las paredes, deficiencias en los sistemas de drenajes, lo cual se agrava si sumamos el transporte de elementos como hielo, tierra, piedras, partes de la estructura, por lo que también puede contribuir a la dispersión de material radiactivo a el medio ambiente en un accidente. Además puede afectar la comunicación y las redes de transporte alrededor del sitio y también podría generar importantes erosiones que debieran ser consideradas.

En esta sección se indican determinadas consideraciones que se deben tener en cuenta para una evaluación de riesgo ante una inundación, la información necesaria para realizar los modelos para determinar la generación de mapas de inundación , probabilidades máximas y el efecto sobre el terreno para fenómenos como Tormentas, Oleaje, Tsunami, Seiches , Escorrentía e inundaciones repentinas por emisiones de agua naturales o artificiales de almacenamiento. Por ultimo se identificaran los organismos que en Chile se encargan de la recopilación de la información necesaria para este tipo de evaluación y si ya existen estudios sobre impacto de inundaciones o mapas de riesgos para el territorio nacional.

A. Información e investigación necesaria

Para garantizar la seguridad ante inundaciones deberán realizar investigaciones y evoluciones en todas las fases del proyecto, desde la selección del sitio (análisis regional, selección y fase de clasificación) pasando por la definición de la base del diseño de las medidas de protección in situ y la vigilancia hasta la fase de evaluación periódica. Para ellos se hace

hincapié en que las metodologías de estudios sean las correctas. Se recomienda las siguientes consideraciones antes de comenzar evaluar.

- Las acciones tomadas para la protección de la central y el sitio de esta son similares ante peligros de inundaciones en sitios costeros¹⁶ y sitios cercanos a ríos¹⁷.
- En ambos sitios las causas de los efectos meteorológicos son a menudo las mismas o muy similares.
- Se debe tener en cuenta que los efectos ocurridos en el ambiente marino y en el ambiente de ríos se pueden combinar, por lo que debe tener un tratamiento conjunto.
- Para asegurar la fiabilidad y suficiencia de los datos, es necesario evaluar la información histórica para realizar análisis de los fenómenos ya ocurridos y también es preciso realizar distintos enfoques técnicos para la generación de nuevos datos como contrastar un enfoque determinístico con uno probabilístico. También se deben realizar mecanismos para actualización de los análisis de riesgo relacionados con variaciones repentinas de precipitaciones y cuencas.
- Se deben considerar los resultados obtenidos de los otros análisis como la Evaluación de Riesgo por Eventos Meteorológico (relacionado con inundaciones por tormentas, grandes olas, etc.) y la Evaluación de Riesgo para Eventos Sísmicos (peligros ante tsunamis).
- Se debe considerar toda la información o bases de datos históricas sobre eventos ocurridos.

B. Fenómenos o Eventos Causantes de Inundación A continuación se mostraran las un listado de los fenómenos que tienen mayor posibilidad de generar inundación y la respectiva información necesaria para generar informes y evaluaciones de riesgos y efectos.

1. Tormentas

Se llama tormenta o tempestad al fenómeno atmosférico caracterizado por la existencia próxima de dos o más masas de aire de diferentes temperaturas. Este contraste da origen a fuertes movimientos ascendentes y descendentes produciendo lluvias, viento, nieve, agua nieve y relámpagos y truenos.

¹⁶Pueden ser abiertas o semi-cerradas y cerradas. Zonas costeras abiertas están directamente expuestas a una porción de tierra mayor. Zonas semi-cerradas son lagunas, estuarios del río, golfos, fiordos. Zonas cerradas son lagos y embalses.

¹⁷Sitios vulnerables a las inundaciones fluviales que se encuentran en la costa del río o en cuencas fluviales.

Estudios a considerar para el emplazamiento ante riesgo de tormentas.

- Se deben reevaluar según espacios abiertos, semi-cerrado o cerrados de agua ya que la generación dependerá de la ubicación de la región y sus características. Para esto se debe apoyar de modelos bidimensionales y tridimensionales de la configuración de la costa y estructura del viento sobre el terreno.
- Análisis de condiciones meteorológicas extrema: patrón de viento sobre el terreno, gradiente de presión, velocidad central de la tormenta; evaluar las condiciones y parámetros que definen los ciclones o tormentas como dimensiones y aumentos máximos, dirección de tormentas y velocidad de translación, etc.
- Análisis de viento: velocidad máxima del viento, presión atmosférica superficial, fricción de los vientos, coeficiente de estrés, aumento repentino del viento, dirección, ruta, velocidad, etc.
- Análisis de las aguas y mareas: efectos de las olas dentro de una marea, análisis de niveles de agua, nivel marea alta, nivel alto en lago, probabilidad superar los niveles y coincidencia con tempestades, evaluar movimiento del agua, diferencias de mareas astrológicas, anomalías del nivel del mar. Calculo de tiempo histórico asociado a mareas. En ríos y estuarios que desembocan en grandes masas de agua determinar, enrutamiento de las aguas y aumentos repentinos, etc.
- Medición de los muros costeros y su erosión, etc.

2. Oleaje

Las olas son producidas por ondas que se desplazan por la superficie de mares y océanos, puesta en marcha por acción del viento, la tensión superficial y la acción gravitacional.

Estudios a considerar para el emplazamiento ante riesgo de oleaje.

- Generación de olas por el viento: Análisis de viento descrito en el punto anterior. Cálculos en distintos momentos dentro de una tormenta dentro de las proximidades del sitio. Altura de las olas y periodos de tiempo
- Generación de olas en alta mar: evaluar campos de vientos, profundidad del agua, transición de agua superficial. Modelo de ondas de espectro. Evaluación de las ondas profundas. Evaluación datos históricos sobre olas extremas y olas de alta mar.
- Evaluar fenómenos de propagación de la ola: fricción, refracción, difracción, reflexión, ruptura y regeneración.

- Ondas de espectro en la cercanía de la costa.: análisis de datos históricos de las olas costera (altura, fuerza rompimiento, periodo), máximo nivel del agua. Variaciones del nivel del agua costero generado por el acción de las olas.
- Apoyo de estudios batimétricos¹⁸.

3. Tsunamis

Un maremoto o tsunami es una ola o un grupo de olas de gran energía que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua. Se producen por terremotos submarinos, erupciones volcánicas, depresiones, deslizamientos de tierra submarinos o de hielo. Este tipo de olas remueven una cantidad de agua muy superior a las olas superficiales producidas por el viento las que pueden generar grandes inundaciones en las zonas costeras.

Estudios a considerar para el emplazamiento ante riesgo de Tsunamis.

- Evaluación de los efectos si el sitio que podría ser afectado por un tsunami.
- Análisis sísmico y de fallas de la zonas: características geológicas, tectónicas y sísmicas. Esta evaluación puede ser determinada en conjunto con la Evaluación de Riesgo para Terremotos y Fallas Superficiales ya descrita anteriormente.
- Utilización de datos históricos, registros mareográficos. Análisis topográfico costero y análisis batimétricos del fondo del mar.
- Evaluación para otras causas no sísmicas: deslizamiento de tierra, caídas de hielo, erupciones volcánicas, etc. Determinar dinámica de tiempo, velocidad, cantidad de agua generada en movimiento.
- Evaluación de sistemas de ondas y los fenómenos de propagación de olas tanto para tsunamis locales como lejanos.

4. Seiches

Seiche es una oscilación en un cuerpo de agua cerrado o semi-cerrado como lagos, piscinas, mares y bahías que se generan en respuesta a una perturbación atmosférica, oceanográfica o sísmica. Se pueden generar olas entre 4 a 7 metros¹⁹ inundando las zonas aledañas.

¹⁸La batimetría es la ciencia que mide las profundidades marinas para determinar la topografía del fondo del mar.

¹⁹Caso en Bahía de Santiago, Lago de Atitlán, Sololá, Guatemala. 6 octubre 2005.

Estudios a considerar para el emplazamiento ante riesgo de seiches

- Par el riesgo de seiches se puede utilizar los mismos estudios realizados para posibles tormentas, análisis sísmico, análisis de viento, análisis meteorológicos extremos ya que por cualquiera de estas formas puede ser excitada la formación de seiches. Se debe determinar la máxima posibilidad de Seiche.
- Estudios batimétricos de las masas de agua y topográficos del sitio.

5. Escorrentía

La escorrentía se forma cuando los compartimentos del suelo están saturados de agua y esto ocurre cuando el agua no es totalmente evaporada o infiltrada a través del suelo. Las aguas que logran mantenerse en movimiento sobre la superficie se convierten entonces en aguas de escorrentía. También se pueden ocasionar por el derretimiento de hielo o nieve y son la principal causa de erosión del suelo.

Estudios a considerar para el emplazamiento ante riesgo de escorrentía

- Realización de flujos hidrológicos, mediciones de niveles de agua y variaciones en el flujo, velocidad del flujo, determinación de canales de estabilidad, medición de transporte de sedimentos y mediciones de las condiciones de hielo y la contribución del derretimiento en las inundaciones en las cuencas.
- Las condiciones que generan el escurrimiento se evalúan sobre la base de un análisis
- Meteorológicos, hidrológicos para las precipitaciones y las características fisiográficas morfológicas de la cuenca y su erosión.
- Utilización de datos históricos de precipitaciones e inundaciones registradas. Determinación de enrutamientos de inundación.

6. Emisiones repentinas de aguas naturales o artificiales de almacenamiento

Este tipo de inundaciones ocurren cuando existen filtraciones, desbordes, rompimientos, fallas o deslizamientos de tierra de represas naturales o artificiales generadas por acciones meteorológicas, hidrológicas o sísmicas.

Estudios a considerar para el emplazamiento ante riesgo de

- Evaluación de fracaso de la estructura de retención debido a acontecimientos meteorológicos, hidrológicos, sísmicos, deslizamiento de tierra, deterioro del hormigón, agrietamiento, fracaso de las puertas, acumulación de desechos u otras causas.

- Evaluación de los efectos dinámicos entre una inundación por precipitación y una por falta de estructura de control a que los efectos son diferentes sobre el sitio como altura de la ola generada, drenaje en la cuenca, enrutamiento de la inundación resultante.
- Análisis sísmico de la represa y las respectivas consideraciones dinámicas de su efecto. Evaluación de resistencia de la represa.

7. Eventos Combinados

La posibilidad de que ocurran sucesos combinados debe ser considerada cuando se evalúa el diseño de inundación para una planta nuclear. Estos acontecimientos deben ser considerados como únicos y deben ser analizados por medio de metodología estocástica y no de carácter lineal de los fenómenos.

Debe ser considerado para la evaluación combinada:

- Para inundaciones costeras, estuarios ríos: fenómenos extremos, relación de viento y olas no relacionadas con fenómenos extremos, referencias de niveles de agua incluidas las mareas.
- Determinación de la probabilidad de que ocurran eventos combinados como seiches, tsunamis escorrentías, olas, tormentas y otras.

C. Información disponible en Chile

Mucha de la información necesaria para realizar los estudios de emplazamiento relacionados con el riesgo de inundaciones en Chile actualmente es recolectada por diversos organismos principalmente gubernamentales como el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Dirección Meteorológico de Chile, Dirección general de aguas y Servicio Nacional de Geología y Minería.

1. Servicio Meteorológico de la Armada de Chile

Encargado de la generación y entrega de la siguiente información

- Pronóstico general marítimo, pronóstico de bahías, pronóstico de canales, pronóstico insular oceánico y el pronóstico antártico.
- Cartas de superficie
- Cartas pronósticos de vientos y la intensidad en nudos.
- Cartas pronósticos de olas con altura en metros.
- Límites de Hielo marino en el Territorio Antártico

- Informe pluviométrico por ciudad: última agua caída, total agua a la fecha, normal a la fecha, promedio 30 años, déficit o superávit respecto de año normal a la fecha, pluviometría histórica.

2. El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA)

De esta depende dos centros de estudios que permiten la generación de datos: Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC) y el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM)

Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC),

Los datos hidrográficos más importantes que maneja lo constituye el valor georeferenciado de la profundidad del mar, lago o río, que constituye la Base de Datos Batimétricos. También cuenta con la siguiente base de datos:

- Gráficos y Estadísticas de Temperaturas Superficiales y Nivel del Mar de estaciones ambientales costeras.
- Base de Datos de Estaciones Oceanográficas
- Base de Datos de Olas
- Base de Datos de Corrientes
- Base de Datos de Mareas

Además está a cargo del Programa CIAMAR que estudia de forma multidisciplinaria aspectos morfológicos, meteorológicos, biodiversidad marina y de morfología submarina en zonas remotas como fiordos²⁰ e islas oceánicas

3. Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM)

A partir de 1997, el SHOA ha desarrollado Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU) para la costa de Chile, las cuales permiten definir niveles de inundación máximos esperados para las principales zonas urbanas y portuarias del borde costero ante eventos sísmicos más probables, de acuerdo a la estimación de los periodos de recurrencia de terremotos costeros en cada región del país.

Han sido publicadas las cartas correspondientes a las localidades costeras de Arica, Iquique, Tocopilla, Antofagasta, Mejillones, Taltal, Chañaral, Caldera, Huasco, La Serena; Coquimbo, Los Vilos, Papudo, Quintero, Valparaíso, Viña del Mar, Algarrobo, San Antonio, Constitución, Talcahuano, Peuco, Lirquén, Tomé, San Vicente, Coronel, Lebu, Corral y Ancud.

²⁰Un fiordo es un valle formado por glaciación que se hundió en el mar quedando en forma de golfo o estrecho y profundo. Normalmente son estrechos y están bordeados por empinadas montañas que nacen bajo el nivel del mar. Están cubiertos de agua salada

4. Dirección Meteorológica de Chile

Al estar encargado de manejar la información meteorológica aeronáutica operativa relevante para la seguridad y planificación de vuelos, cuenta con la mayor base de datos meteorológicos del país. La información entregada por esta entidad en el punto de Evaluación por Riesgo Meteorológico es la misma utilizada para esta sección por lo que se recomienda revisar ya que deben ser tratadas en conjunto.

5. Dirección general de aguas (DGA)

La información estadística, proporcionada por el sistema computacional Banco Nacional de Aguas (BNA) registra toda la información histórica de la Red Hidrometeorológica Nacional, considerando las siguientes variables:

- Fluviométrica²¹
- Calidad de aguas
- Meteorología
- Pluviométrica
- Aguas Subterráneas
- Sedimentométricas

También proporciona información Georeferenciada²² con las siguientes coberturas:

- Delimitación de cuencas, subcuencas.
- Balance hídrico: Temperatura, Precipitaciones, Escorrentía, Evo transpiración Real y Evaporación de tanque.
- Mapa hidrogeológico: Información Hidrogeológica general y Geología
- Inventario de Glaciares: RM, VI, VII, V.

6. SERNAGEOMIN

Dentro del departamento de Geología se realizan los siguientes estudios que pueden ser utilizados en la evaluación de inundaciones:

- Estudios de aguas subterráneas.

²¹La Red Fluvimétrica tiene por objetivo es proporcionar a un mínimo costo las características de los caudales como datos cuantitativos, promedios y extremos, que definen la distribución estadística del caudal estudiado.

²²La georeferenciación es el posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen).

- Peligros de remoción de masas donde se identifican y evalúa las áreas que podrían verse afectadas por fenómenos de remoción de masas como deslizamientos o caídas de bloques con cartografía que varía desde 1:25.000 a 1:250.000, y generalmente, representa el territorio según la posibilidad de verse afectado.
- También se encarga de realizar estudios para determinan las áreas que pueden verse adversamente afectadas por efecto de crecidas de ríos u otros cuerpos de agua. Los resultados de estos estudios se presentan en mapas que zonifican el territorio de acuerdo a la mayor o menor posibilidad de que éste se inunde. La escala de estos estudios varía entre 1:100.000 y 1:250.000, y se utilizan como una herramienta para la planificación territorial.

Hemos podido determinar la implicancia de varios organismos para la entrega y generación de información para la evaluación del riesgo por inundaciones.

Se concluye que existe información histórica y bases de datos suficientes para la generación de modelos predictivos de probabilidades máximas para todos los fenómenos descritos con anterioridad.

Se comprueba que existen mapas de riesgo de inundaciones para diversas zonas del territorio chileno como los de la Armada de Chile para riesgo por tsunami y los generados por el SERNAGEOMIN, pero no existen para todo el país.

También queda en evidencia que faltarían estudios específicos y puntuales según las características de cada prospecto de sitio elegido, los cuales pueden ser realizados por privados o como queda de manifiesto por estos organismos, descritos anteriormente, tienen la obligación de contribuir al desarrollo de investigaciones que sean de interés para el país o cualquier especificación que pida el Estado.

También se concluye que para efectos de la Evaluación por Riesgo de Inundación, no sólo se debe considerar los resultados en las Evaluaciones por Riesgos Meteorológicos y Evaluación por Riesgo Sísmico y Fallas, sino que es necesario que se trabajen en conjunto o de manera complementaria

2.1.1.4. Riesgos geotécnicos

Al establecer la localización óptima de una central nuclear es de suma importancia el desarrollo de un estudio geotécnico para analizar el riesgo sobre la instalación debido al colapso, subsidencia o levantamiento del terreno, al deslizamiento de tierras, rocas o nieve, o a cualquier otra inestabilidad del subsuelo como es la licuefacción; y así determinar soluciones ingenieriles, métodos apropiados de construcción y sistemas de vigilancia específicos, que aseguren la estabilidad del subsuelo durante la operación de la planta.

La investigación de las condiciones del subsuelo en el emplazamiento de una planta de energía nuclear es importante en todas las etapas del proceso de evaluación de localización. El propósito de esta investigación es proporcionar información o datos básicos para la toma de decisiones sobre la naturaleza y la idoneidad de los materiales del subsuelo. En cada etapa de la evaluación de localización, el programa de investigación debería proporcionar los datos necesarios para una caracterización apropiada del subsuelo. Las investigaciones más detalladas sobre el subsuelo debieran ser llevadas a cabo en las etapas posteriores. Los requerimientos específicos variarán significativamente de una etapa a otra.

El programa de investigación debería atender a todas las etapas del proceso de evaluación del sitio: etapa de selección, etapa de caracterización, etapa pre-operacional y etapa operacional.

Los resultados de las investigaciones descritas en esta sección debieran estar apropiadamente documentados con referencia a las condiciones del sitio en particular (suelo o roca), la etapa del proceso de evaluación del sitio en cuestión y los análisis de verificación requeridos.

Los diversos métodos de investigación – estos es, la utilización de documentos históricos y actuales, exploración geofísica y geotécnica in situ, y pruebas de laboratorio – son aplicables a todas las etapas del proceso de evaluación de localización, pero en diferentes grados. Esta sección indica el nivel de investigación necesario para la evaluación del sitio en términos de rendimiento de los materiales del subsuelo y los trabajos de tierra bajo las condiciones de carga (estática y dinámica) anticipadas.

A. Perfil geotécnico

Varios parámetros deben ser determinados con el fin de realizar la evaluación geotécnica necesaria para la construcción de una planta nuclear. El conjunto resultante de parámetros y datos es llamado el perfil. El perfil puede definirse como una descripción geométrica y mecánica de los materiales del subsuelo, en el cual las mejores estimaciones y rangos de variación para las características de los materiales de base (fundaciones) están determinados y descritos de tal forma que sea directamente aplicable a los análisis siguientes.

Los principales aspectos a considerar en la elaboración del perfil geotécnico para un sitio en particular son:

1. Inestabilidad de ladera

El sitio y sus alrededores serán evaluados para determinar el potencial de riesgo de inestabilidad de ladera (como deslizamiento de tierra y roca y avalanchas de nieve) que podrían afectar la seguridad de la instalación nuclear.

Si se encuentra una potencial inestabilidad de ladera que podría afectar la seguridad de la instalación nuclear, el riesgo se evaluará mediante parámetros y valores para el sitio específico donde se realizarán los movimientos de tierra.

2. Colapso, subsidencia o levantamiento de la superficie del lugar

Se deben examinar mapas geológicos y otra información pertinente de la región en busca de la existencia de características naturales tales como cavernas, formaciones cársticas, y otras hechas por el hombre tales como minas, pozos de agua y pozos de petróleo. Se debe evaluar el potencial de colapso, subsidencia o levantamiento de la superficie del lugar, y de ser así, se deberán proporcionar posibles soluciones de ingeniería, o de lo contrario el sitio se considerará inadecuado.

Si parecen ser viables las soluciones de ingeniería disponibles, se deberá desarrollar una descripción detallada de las condiciones del subsuelo obtenidas en base a métodos confiables de investigación con el propósito de determinar los riesgos.

3. Licuefacción del suelo

El potencial de licuefacción de los materiales del subsuelo del sitio propuesto debe ser evaluado usando parámetros y valores para el sitio específico donde se realizarán los movimientos de tierra.

La evaluación debe incluir el uso de métodos aceptados de investigación de suelos y métodos analíticos para determinar los riesgos.

Si el potencial de licuefacción de suelo es considerado inaceptable, el sitio deberá ser declarado inadecuado a menos que se demuestre la existencia de soluciones de ingeniería que se puedan llevar a la práctica.

4. Comportamiento de los materiales de base

Se deben investigar las características geotécnicas de los materiales del subsuelo, incluyendo las incertidumbres sobre éstas, y se debe determinar un perfil del suelo del sitio, de forma acorde con los propósitos de diseño.

Se debe evaluar la estabilidad del material de base bajo carga estática y sísmica. Y además se debe estudiar el régimen de agua subterránea y las propiedades químicas de ésta.

B. Etapas de análisis

1. Etapa de selección

El propósito de una investigación en la etapa de selección de sitio es determinar si los lugares son apropiados o no. En esta etapa son considerados aspectos geológicos, geomorfológicos y geotécnicos, y usualmente son identificadas regiones o áreas que son excluidas de exámenes más detenidos. La información del subsuelo para esta etapa es obtenida usualmente a partir de documentación histórica y actual, y por medio del reconocimiento de terreno, incluyendo inspecciones geológicas y geomorfológicas, y es usada en las siguientes evaluaciones:

- a) Condiciones inaceptables del subsuelo. Un sitio con condiciones geológicas que podrían afectar la seguridad de la planta nuclear y que no pueden ser corregidas por medio de tratamientos geotécnicos o compensadas mediante medidas constructivas, es inaceptable. Peligros geológicos tales como falla de superficie, actividad volcánica, deslizamientos de tierra, permafrost, procesos de erosión, subsidencia y colapso de las cavidades subterráneas (tanto naturales como derivadas de actividades humanas), u otras causas deberían ser identificadas y evaluadas. El área de investigación debería ser apropiada para el riesgo que se está considerando.
- b) Clasificación de sitios. Las condiciones del subsuelo en un sitio se pueden derivar de la literatura geológica y geotécnica. Un sitio puede ser clasificado como un sitio rocoso, de roca blanda o dura, un sitio de suelo blando, o una combinación de ambos. Los tipos de suelo se dividen en suelos cohesivos y no-cohesivos. Sin embargo, esta clasificación tan rígida puede no ser aplicable para ciertos terrenos. Por ejemplo, las formaciones cuaternarias pueden presentar interfaces complejas entre roca y arcilla que debieran ser cuidadosamente investigadas y monitoreadas.
- c) Régimen de aguas subterráneas. La literatura hidrogeológica puede permitir que sea hecha una estimación de la ubicación y régimen de las aguas subterráneas.
- d) Condiciones de la fundación. Se pueden determinar el tipo de suelo, la profundidad de la roca y las propiedades del depósito. Esto permite la selección preliminar de los tipos de fundación aceptables.

Sobre la base de la información anteriormente mencionada de las condiciones del subsuelo, los potenciales sitios candidatos pueden ser rankeados de acuerdo a la idoneidad de la fundación. En esta etapa, también se deberían hacer inferencias acerca

de peligros geológicos, efectos sísmicos de amplificación, potencial de licuefacción, la capacidad de carga, el potencial de subsidencia y levantamiento, las interacciones estructurales del suelo y las condiciones de las aguas subterráneas. Después de esta etapa, los sitios son seleccionados para un examen más riguroso en base a las consideraciones geotécnicas.

2. Etapa de verificación

En la etapa de verificación, se supone que, en términos generales, ya se han establecido los diseños principales y las cargas de construcción. Los siguientes factores deberían ser considerados en la evaluación, para tener en cuenta tanto en las condiciones normales como en las condiciones extremas, como terremotos e inundaciones:

- Riesgos geológicos
- Condiciones geológicas y de subsuelo
- Potencial de licuefacción
- Tipos de fundación factible
- Capacidad preliminar de carga y otros factores de estabilidad de fundación
- Rangos preliminares de subsidencia
- Niveles y regímenes de aguas subterráneas
- Uso previo del terreno
- Requerimientos de preparación del lugar

En esta etapa, el programa de investigación debería cubrir el emplazamiento en su conjunto, así como también a una menor escala, apropiada para consideraciones de diseño.

Las siguientes técnicas de investigación del lugar y puntos relacionados deberían ser considerados:

- Pozo de perforación rotatorio
- Pruebas in situ
- Estudio de refracción y reflexión sísmica
- Pruebas de laboratorio

En las investigaciones de campo, se debe poner cuidado en identificar características indeseables del subsuelo, tales como zonas de cavidad, levantamiento de terrenos, la aparición de bolsas de gas, zonas de debilidad o discontinuidad en rocas cristalinas y potenciales deslizamientos originados por capas inestables del subsuelo.

3. Etapa de confirmación

El propósito de la etapa de confirmación de localización es confirmar los resultados obtenidos en las etapas anteriores. Un programa de exploración del subsuelo y de pruebas de laboratorio deberían ser dirigidos al sitio en cuestión, utilizando o una red de perforación o un plan alternativo de perforación adecuado para el sitio y la instalación bajo análisis. El espaciamiento de la red puede variar dependiendo de las características de la geometría del subsuelo. El método de red uniforme es especialmente adaptable a un sitio con condiciones del suelo relativamente uniformes. Cuando las diferencias y discontinuidades están presentes, el proceso de exploración habitual debería complementarse con perforaciones espaciadas lo suficientemente poco como para permitir la detección de las características y su evaluación particular. Se deben considerar las consecuencias de la perforación para el régimen de aguas subterráneas, y posiblemente para el agua potable.

Como mínimo, se deberían considerar los siguientes indicadores de potenciales cavidades y susceptibilidad de colapso de terrenos:

- Estanques, cuevas y cavernas hundidas
- Hundimiento de arroyos
- Subsistencia histórica del terreno
- Minas y signos de actividades asociadas
- Puentes naturales
- Depresiones superficiales
- Muelles
- Tipos de rocas tales como piedra caliza, dolomita, yeso, anhidrita, halita, suelos de terra rossa, lavas, rocas clásticas débilmente cimentadas, carbón o minerales

En esta etapa, las características preliminares de la planta tales como la carga, las dimensiones físicas de la edificación, el criterio de la ingeniería estructural preliminar y los diseños elegidos para la planta son conocidos. El contenido de las pruebas in situ y de los programas de pruebas de laboratorio deben planificarse sobre la base tanto de las características preliminares de la planta como de los aspectos geotécnicos que se han identificado en las etapas previas.

Las profundidades necesarias de perforación variarán con las condiciones del lugar, pero las perforaciones debieran ser lo suficientemente profundas para ser capaces de

describir completamente las condiciones del lugar que será afectado por las estructuras y confirmar las condiciones del suelo y de las rocas determinadas en las primeras investigaciones.

En esta etapa, deben realizarse suficientes pruebas in situ y de laboratorio para permitir la estimación de la capacidad de carga, la determinación de los soportes de la estructura y la amplificación de las ondas sísmicas en el lugar, el establecimiento de parámetros de interacción (estática y dinámica) de las estructuras del suelo, evaluación del potencial de licuefacción y la evaluación de un espectro de respuesta de un diseño específico de localización, si es necesario.

Si se ha encontrado necesario hacer mejoras en las condiciones del subsuelo, éstas deben ser hechas en esta etapa y su eficacia debiera ser verificada por pruebas in situ.

Los resultados de las investigaciones de esta etapa se suelen combinar con bases de datos obtenidos de las fases previas en un reporte geotécnico detallado. Este informe debería contener los siguientes ítems:

- Perfiles y mapas geológicos
- Descripciones de factores geológicos y la geología del área
- Un programa de exploración y las bases de éste
- Planos de ubicación y secciones transversales para las perforaciones
- Los resultados de las pruebas in situ
- Los resultados de las pruebas de laboratorio
- Los resultados de los estudios geofísicos
- Descripción y resultados de los análisis
- Descripciones detalladas del régimen de aguas subterráneas y de las propiedades físico-químicas de estas aguas

Los resultados de la etapa de verificación de sitio deberían entregar la información necesaria para el establecimiento de parámetros de diseño y conclusiones relativas al sitio y sus características. La etapa de verificación debiera ser consistente con el diseño final de las edificaciones en el lugar. Cualquier información geotécnica adicional requerida será relacionada, directamente, con cada una de las edificaciones, estructuras e instalaciones de apoyo.

C. Información disponible en Chile

Como podemos ver, una evaluación de riesgos y características geotécnicas es muy específica para cada lugar y para cada tipo de proyecto a desarrollar. El organismo encargado, teniendo esto en cuenta, y resaltando la importancia del desarrollo de estos estudios, es el SERNAGEOMIN²³.

Una de las principales labores de SERNAGEOMIN en el ámbito de la geología ambiental consiste en el desarrollo de cartografía orientada a la Planificación Territorial (Geología para el Ordenamiento Territorial). En esta temática se integra el trabajo de diferentes especialidades desarrolladas dentro de la Subdirección de Geología (Geología Regional, Geología Económica, Geología Aplicada), generándose estudios interdisciplinarios, orientados principalmente a la planificación del uso del territorio y la gestión ambiental. En ellos se incorpora información de peligros geológicos, estudios geotécnicos, presencia y calidad de recursos de agua subterránea, vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos, caracterización y distribución de recursos de rocas y minerales industriales y patrimonio geológico cultural, entre otros. Estos mapas, que se presentan a escalas que varían entre 1:25.000 y 1:250.000 son publicados en boletines, informes registrados y en la Carta Geológica de Chile, serie Geología Ambiental.

Por otra parte, un papel muy importante desempeñan: la División Estructuras-Construcción-Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, el Grupo de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería en Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, la Universidad Católica del Norte (Antofagasta) y la Universidad de Concepción, que lideran la docencia y actividades de investigación asociadas al área de la geotecnia. Éstas, así como también algunas empresas privadas²⁴, participan de licitaciones realizando estudios específicos encargados por organismos del Estado. Entre los ensayos geotécnicos habituales que desarrollan se destacan:

- Medición de propiedades índice (humedad, peso específico, permeabilidad, granulometría, etc.)
- Medición de compacidad para obras de tierras
- Medición de propiedades resistentes y cambio de volumen
- Medición y prospección in situ (estratigrafías, ensayos de placa de carga, sondajes de cono dinámico, etc.)

Los proyectos geotécnicos que desarrollan se desenvuelven dentro de las siguientes áreas:

²³<http://www.sernageomin.cl>

²⁴Las más importantes son SIGA Consultores S.A., Geoestudios Ltda. y Geotecnia Ambiental Ltda.

- Geotecnia de fundaciones
- Geotecnia de obras viales y terrestres
- Geotecnia ambiental
- Geotecnia en la minería
- Inspección y control

En conclusión, a pesar de que probablemente a la hora de instalar una planta nuclear en Chile no se encuentre mucha información geotécnica histórica o actual relevante, sí podemos decir que existen organismos capacitados para realizar estos estudios, y todas las mediciones tanto in situ como en laboratorio que significa, además de contar con el instrumental requerido.

Eso sí, cabe señalar, con relación a la función del SERNAGEOMIN, que desde sus comienzos en 1981, éste ha estado bajo la tutela del Ministerio de Minería, lo cual en ocasiones no ha favorecido el desarrollo de programas relacionados con temáticas ajenas al desarrollo estrictamente minero. De este modo, durante 21 años se han llevado a cabo sólo escasos planes de investigación básica, los que hoy demuestran ser necesarios. Estos programas deben ser reforzados y adecuados ante las crecientes demandas por parte de autoridades y empresas con respecto a los temas de peligros naturales y medio ambiente. Basta señalar las crecientes peticiones de información sobre agua subterránea, las demandas por resolver sobre estudios de impacto ambiental o los requerimientos sobre lugares aptos para ubicar rellenos sanitarios, los cuales son sólo algunos ejemplos de la necesidad de estudios básicos. Sin embargo, aún no hay un respaldo financiero decidido del Estado a la ejecución de planes de investigación en líneas tales como hidrogeología, peligros geológicos y geotecnia.

2.1.1.5. Acontecimientos externos inducidos por el hombre

Las instalaciones y actividades realizadas por el hombre en la cercanía de una planta nuclear pueden afectar su seguridad bajo ciertas condiciones. Esto debe ser considerado en el emplazamiento y diseño de la central.

Debe realizarse una predicción sobre el desarrollo futuro de la región, con el fin de anticipar futuras actividades riesgosas que pudiesen realizarse en ellas. Para esto se debe considerar el nivel de control administrativo existente.

A. Recolección de información e investigación

Las fuentes potenciales para eventos inducidos por el hombre pueden clasificarse en:

- Fuentes estacionarias: En las cuáles el mecanismo de inicio tiene localización fija, como las plantas químicas, refinerías de petróleo, depósitos y otras instalaciones nucleares en el mismo sitio.
- Fuentes móviles: El mecanismo de inicio no está completamente confinado, como cualquier método de transporte de materiales peligrosos y proyectiles potenciales.

B. Identificación de fuentes potenciales

Pueden ser considerados fuentes de riesgo cualquier instalación en la que se maneje, procese o almacene materiales potencialmente peligrosos, tales como los materiales explosivos, inflamables, corrosivos, tóxicos o radiactivos, tanto si pertenecen a un establecimiento en construcción, operación o desmantelamiento.

Con respecto a los riesgos por choques de avión deben ser investigados los aeropuertos con sus patrones de despegue, aterrizaje y almacenaje de los aviones. Además se debe investigar el tipo de avión involucrado, las frecuencias y las rutas de tráfico aéreo que puedan pasar por la zona del sitio.

El transporte de materiales peligrosos por mar o ríos debe ser considerado ya que puede poner en riesgo la instalación u otro sistema de apoyo de la central como por ejemplo la fuente de agua de enfriamiento. También es necesario tomar en cuenta las vías terrestres como vías férreas o caminos ya que podrían ser una importante fuente de riesgo, sobre todo en el caso de aquellas que soportan una gran actividad.

Otra fuente potencial de riesgo son las instalaciones militares ya que en ellas se almacenan materiales peligrosos, además de realizarse en ellas actividades riesgosas. Especial atención hay que tener con lo aeropuertos militares y campos de entrenamiento.

En el análisis de la factibilidad de un sitio desde el punto de vista del riesgo por eventos inducidos por el hombre se debe planificar considerando las actividades que puedan ser realizadas a futuro en la zona. Dichas actividades pueden incrementar tanto el riesgo sobre la planta por eventos externos, como las consecuencias radiológicas que estos provocarían.

C. Efectos y parámetros asociados

Las fuentes anteriormente mencionadas pueden causar eventos que tendrían efectos como:

- Impacto de proyectil
- Calor (fuego)
- Humo y polvo

- Gases tóxicos y asfixiantes
- Ataque químico por gases corrosivos o radiactivos, aerosoles o líquidos
- Sacudimiento del suelo
- Inundación o falta de agua
- Colapso o deslizamiento del terreno
- Interferencia electromagnética
- Corrientes de remolino sobre la tierra

Algunos de estos efectos podrían afectar tanto las instalaciones de la planta como características esenciales para la seguridad de la planta, como las rutas de evacuación, la posibilidad de implementar medidas de emergencia y el acceso a la fuente de enfriamiento. Además algunos de esos efectos pueden estar asociados con más de una fuente o potenciarse al interactuar entre ellos.

D. Recolección de información

Primero se debe preparar una lista de fuentes de riesgo presentes en la región y dividir esa lista en diferentes categorías tales como estacionarias y móviles. La extensión de la región relevante depende del tipo de fuente.

La información sobre instalaciones y actividades actuales y futura puede ser obtenida de mapas, reportes publicados, reportes públicos, agencias públicas y privadas y aprendizajes individuales sobre las características del área.

Una vez que las potenciales fuentes de riesgos han sido identificadas se deben evaluar factores como la magnitud, la probabilidad de ocurrencia de un evento y la distancia de la fuente al sitio de la instalación. Una vez evaluados se debe definir cuales fuentes y eventos serán relevantes para definir si el sitio es apto y para el diseño de la planta.

Para algunos eventos no va a existir una base regional que permita estimar de manera confiable su probabilidad de ocurrencia o severidad probable por lo que se recomienda utilizar datos a nivel nacional, continental o incluso global para mejorar la calidad y cantidad de información y poder tomar decisiones mejor informadas.

E. Mapa de fuentes de riesgo

Se debe preparar un mapa en el que se muestren la ubicación y distancia con el sitio de todas las fuentes identificadas en la recolección de información. El mapa debería mostrar toda fuente potencial de riesgo y reflejar cualquier actividad proyectada en la zona del sitio

que pueda afectar la seguridad durante toda la vida útil de la planta, revisando planes de desarrollo de la región.

F. Procedimientos de exploración y evaluación

La información recogida es utilizada primero en una etapa de exploración de dos pasos para eliminar aquellas fuentes que no serán consideradas más tarde, sobre la base de la distancia o la probabilidad. Para algunas fuentes un modelo determinístico simple puede ser suficiente para mostrar que no puede ocurrir un evento significativo, basado en sus características y distancia al sitio. Por medio de análisis posterior es posible determinar un valor particular para la distancia más allá del cuál los efectos de tal fuente pueden ser ignorados.

Un segundo criterio exploratorio es basado sobre la probabilidad de ocurrencia. En esta Guía de Seguridad el valor límite de la probabilidad anual de ocurrencia de eventos con potencial consecuencias radiológicas es llamado el Nivel de Probabilidad Exploratorio (screening probability level, SPL)²⁵. Esta probabilidad debe ser definida por el ente regulador y a todo evento que tenga una probabilidad menor de ocurrencia no se le debe dar mayor consideración, más allá de sus consecuencias.

Para cada fuente o evento que no es eliminado en el proceso exploratorio de dos pasos, se debe hacer una evaluación más detallada. Se debe recolectar información suficiente para demostrar la aceptabilidad del sitio con respecto al riesgo por eventos inducidos por el hombre. La figura 2.6 muestra un diagrama de flujo de los pasos en los procedimientos para la exploración preliminar y la evaluación detallada.

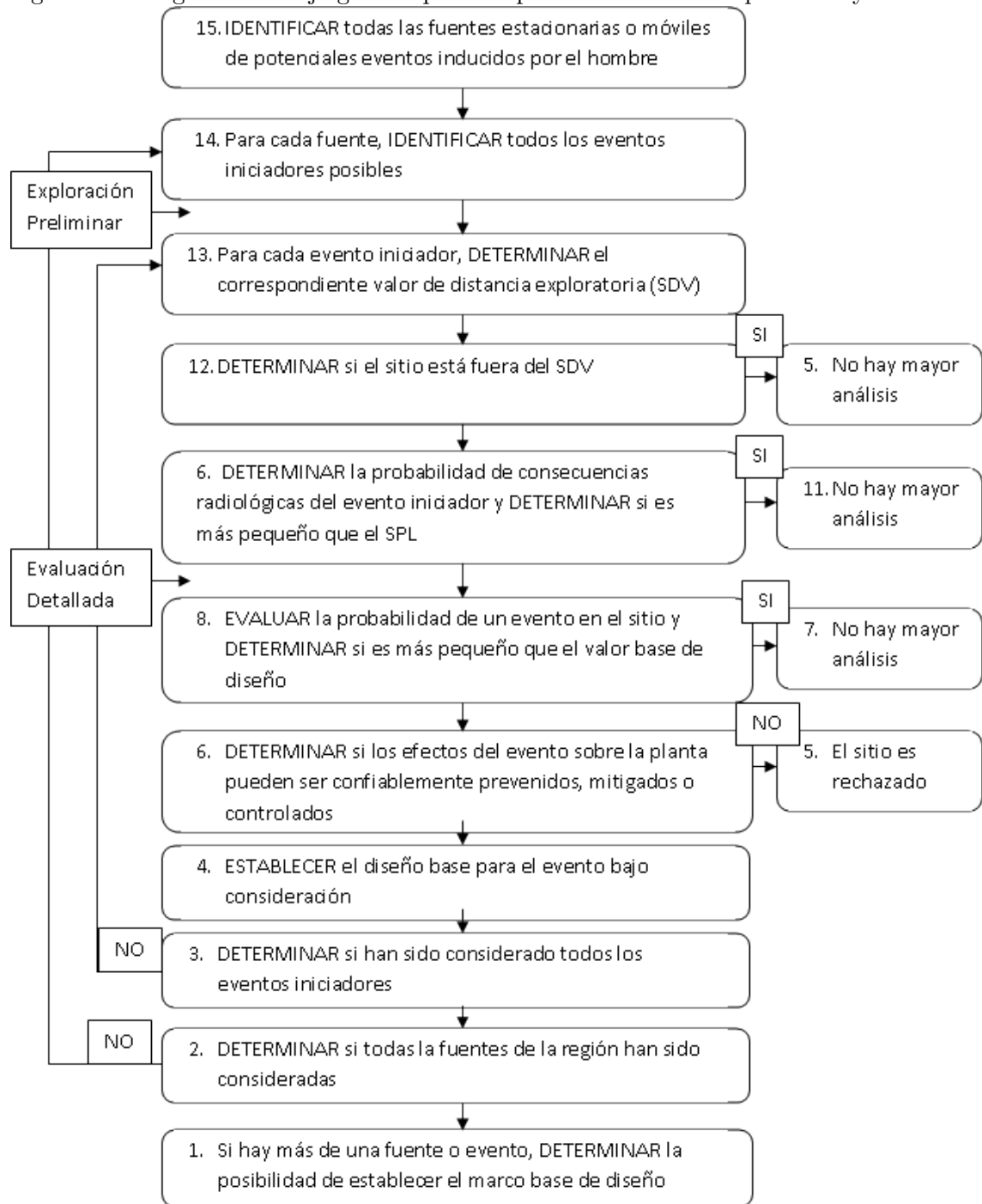
Esta metodología de evaluación puede ser aplicada en el estudio de cualquier potencial evento inducido por el hombre con el fin de determinar el riesgo al que la instalación estaría expuesta y a la vez el riesgo de que uno de estos eventos cause algún tipo de efecto radiológico en el ambiente.

Entre los eventos más significativos de ser analizados encontramos los siguientes:

- Choques de aviones
- Explosiones químicas
- Movimiento de fluidos y flujo de gases explosivos, inflamables, corrosivos, tóxicos asfixiantes o radiactivos
- También deben ser evaluados otros eventos específicos según la zona del sitio, aplicando una aproximación similar

²⁵En algunos estados, es utilizado un valor de probabilidad de 10^{-7} por reactor-año en el diseño de nuevas instalaciones como limite aceptable para la probabilidad de eventos con consecuencias radiológicas serias.

Figura 2.6: Diagrama de flujo general para los procedimientos de exploración y evaluación



Fuente: External Human Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants Safety Guide

G. Información disponible en Chile

Como hemos apreciado es necesario realizar un levantamiento de información detallado para la evaluación de los potenciales riesgos inducidos por el hombre sobre una central nuclear, considerando tanto las condiciones actuales como las futuras, así como también sus características y particularidades.

Para tal efecto, se debe recurrir a toda fuente de información que permita tener una perspectiva sobre las actividades que son realizadas en la zona, tanto de naturaleza estacionaria como móvil.

Entre los organismos que pueden apoyar la obtención de la información están los siguientes:

1. Dirección general de movilización nacional y las Comandancias de Guarnición de las Fuerzas Armadas y Carabineros de Chile: Están a cargo de la supervigilancia de los productos sometidos a control como explosivos y productos químicos peligrosos.
2. CONAMA: Es el órgano fiscalizador en materia medioambiental, y como tal estudia todas las características de las actividades desarrolladas por el hombre que puedan tener impacto en el entorno. Esos estudios pueden señalar eventos iniciadores riesgosos.
3. Intendencias y municipalidades: Definen planes reguladores y de desarrollo por lo que son fuentes de datos sobre el tipo de actividad que puede realizarse en un sector, además de ser útiles para la proyección del desarrollo futuro de la zona.
4. Dirección de aeronáutica civil y Fuerza aérea de Chile: Controlan el espacio aéreo del país por lo que disponen de información sobre rutas aéreas, aeropuertos, aviones, etc.

En esta materia se debe realizar un gran esfuerzo para identificar las potenciales fuentes de riesgo, para lo cual se debe recurrir a fuentes de información que permita reconocerlas.

No se puede definir a priori todas las instituciones e instancias de recolección de información ya que dependerá de las características de la zona, la regulación y otros hechos puntuales cuales serán las que se deberán incluir en la investigación.

Si bien este tópico de seguridad puede parecer a priori menos técnico que otros en el modelamiento de los efectos e interacciones de los distintos eventos es muy importante mantener una sólida base científica que permita obtener conclusiones confiables.

Por último se debe mencionar que se han considerado eventos que son principalmente de naturaleza accidental, lo que no representa de manera absoluta todas las posibles fuentes de riesgo inducidas por el hombre ya que se debe tener presente la posibilidad de eventos de naturaleza intencional que deben ser incorporados al diseño de la planta y a las medidas de seguridad preparadas.

2.1.1.6. Otras consideraciones importantes

En las normas de seguridad de IAEA no especifican los parámetros a considerar para otros fenómenos como el Vulcanismo, pero considerando que en Chile se estima que hay, al menos, 60 volcanes que han tenido algún tipo de actividad eruptiva histórica (últimos 500 años)²⁶ debemos tomarlo en cuenta para efecto de nuestra investigación.

A. Vulcanismo

Fenómeno que consiste en la salida desde el interior de la Tierra hacia el exterior de rocas fundidas o magma, acompañada de emisión a la atmósfera de gases o cenizas o bien el calentamiento del agua de la laguna que puede formarse en el cráter.

Consideraciones para evaluar el riesgo ante vulcanismo:

1. En el caso de elegir sitios aledaños a volcanes es necesario utilizar información histórica de sobre erupciones y actividad registrada.
2. Si se considera que la actividad sísmica en volcanes suele presentarse con meses o años de anticipación a cualquier manifestación observable en el exterior²⁷. Por lo tanto se debe tomar en cuenta los estudios sísmicos volcánicos para el conocimiento y seguimiento del fenómeno.

B. Información disponible en Chile

Dentro de esta temática, el SERNAGEOMIN desarrolla estudios sobre la evolución y comportamiento eruptivo (tipos de erupciones y sus alcances) en los principales volcanes activos de nuestro país. Éstos se distribuyen a lo largo de la Cordillera de Los Andes, tanto en el norte como en el sur del país.

El principal tipo de producto generado, corresponde a mapas geológicos de volcanes, a escala 1:50.000. En los últimos años se ha publicado mapas geológicos de los siguientes volcanes: Villarrica, Llaima, Lanín, Puyehue-Cordón Caulle en el sur del país, y Parícuta y Taapaca en el norte. Actualmente se está trabajando en los siguientes volcanes: Mocho-Choshuenco, Osorno, Casablanca, Calbuco y Nevados de Chillán en el sur, y Láscar, Lastarria, Iruputuncu y Ollagüe en el norte.

Por lo tanto, se concluye que en Chile existe la información histórica de actividad de la mayoría de los volcanes chilenos y además en la actualidad se realizan seguimientos de su estado para determinar los riesgos asociados a ellos sobre la población.

²⁶Fuente: SERNAGEOMIN

²⁷Fuente: SERNAGEOMIN

2.1.2. Características del sitio y los posibles efectos

Las características del sitio y los posibles efectos de la eliminación de desechos radiactivos es presentada en la Guía de Seguridad de la IAEA concerniente a la dispersión de materiales radiactivos ²⁸. La guía proporciona orientación sobre los estudios e investigaciones necesarias para evaluar el impacto de una planta de energía nuclear en los seres humanos y el medio ambiente. También proporciona orientación sobre la viabilidad de un efectivo plan de respuesta de emergencia, y sobre las investigaciones relativas a la distribución de la población, y sobre la dispersión de los efluentes en el aire, y en las aguas superficiales y subterráneas. De esta manera se puede determinar si el sitio seleccionado para una planta de energía nuclear reúne los requisitos a nivel nacional, y cerciorarse que los riesgos para la población y el medio ambiente sean controlados dentro de los límites establecidos por el organismo regulador, teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales.

En la mencionada guía de seguridad se recomienda prestar atención a la utilización de datos ambientales en conjunto con los modelos para asegurar que el tipo de datos sea apropiado para los objetivos de regulación. Sin embargo no es su objetivo entregar orientación en relación a la ubicación de una planta de energía nuclear, ni información detallada sobre los métodos específicos o modelos matemáticos para el calculo de las concentraciones y las tasas de deposición de material radiactivo.

La información que la Guía de Seguridad proporciona en cuanto a orientación para la fase de evaluación in situ de una instalación, se concentra específicamente en:

1. El desarrollo de descriptores meteorológicos, hidrológicos e hidrogeológicos para la localización de la planta.
2. Programas para recopilar datos meteorológicos e hidrológicos (para las aguas superficiales y las aguas subterráneas).
3. Programas para recopilar datos sobre la distribución de la población circundante para demostrar la viabilidad de un eficaz plan de emergencia.

2.1.2.1. Dispersión de material radiactivo a través de la atmósfera y de las aguas superficiales y subterráneas

Ya sea bajo autorización o accidentalmente, las principales vías de exposición para los materiales radiactivos, vertidos desde una planta nuclear, son la atmósfera, y las aguas superficiales y subterráneas.

Desde la atmósfera, los desechos radiactivos, se pueden dispersar en el medio ambiente y transportarse a otros lugares donde es posible que alcancen a la población. De la misma

²⁸International Atomic Energy Agency, Safety Standars Series N° NS-G3.2. Vienna, 2002.

forma, estos desechos, desde el agua pueden llegar a la población en la medida que éste recurso sea consumido o manipulado directa o indirectamente por el ser humano. Además cualquier suspensión de material radiactivo en el aire, la superficie del suelo o en el agua puede ser transmitida por los procesos de infiltración en las aguas subterráneas.

Por estos motivos se justifica la relevancia de realizar una exhaustiva investigación y evaluación, sobre el potencial de contaminación sobre la atmósfera y la hidrosfera. Para esta tarea es necesario evaluar el potencial de contaminación en las aguas superficiales y la posible contaminación de las aguas subterráneas de la superficie. También es necesaria la evaluación del tránsito en la atmósfera e hidrosfera de materiales radiactivos de una planta de energía nuclear bajo condiciones normales de operación o accidentalmente. Incluso este último punto es un requisito de diseño y concesión de licencias.

Es deseable que se creen modelos de dispersión tomando en cuenta los componentes relevantes asociados tanto a las características atmosféricas como a las hidrosféricas. En estos modelos deben ser descritos los efectos de la contaminación sobre el aire, el suelo y el agua, a corto y largo plazo, teniendo en cuenta las condiciones de difusión en la región. Dichos efectos y las consecuencias para el público y el medio ambiente, deben ser evaluados sobre la base de la información meteorológica y las condiciones específicas para el sitio relativas a la tierra, los usos del agua, la distribución de la población, la infraestructura en las inmediaciones del sitio y los parámetros radiológicos relevantes. En función de lo anteriormente descrito se entiende la importancia de efectuar una detallada investigación meteorológica e hidrosférica en la región y el lugar específico de localización.

Los resultados de la investigación meteorológica e hidrológica deben utilizarse para los siguientes fines:

- Confirmar la idoneidad de un sitio.
- Determinar si las características locales se han alterado desde que hizo la evaluación y antes de que la operación de la planta comience.
- Seleccionar y calibrar los modelos de dispersión adecuados para el sitio.
- Establecer los límites de las emanaciones radiactivas en la atmósfera e hidrosfera.
- Establecer límites para el diseño de rendimiento (límites de vertidos radiactivos).
- Ayudar a demostrar la viabilidad de un plan de emergencia.

También deberían ser utilizados para desarrollar un programa de vigilancia y una estrategia de muestreo para su uso en el caso de una liberación radiactiva accidental. Los cálculos de la dispersión y de las concentraciones de materiales radiactivos deben mostrar si las

consecuencias radiológicas de la emisión de desechos, tanto rutinaria como accidental en la atmósfera e hidrosfera, son aceptables. En base a los resultados de estos cálculos es posible establecer los límites autorizados de emisión radiactiva vertida por la planta. Para la determinación de los parámetros normales y accidentales de emisión de la planta nuclear, se deben considerar con respecto a los desechos liberados las siguientes propiedades y parámetros:

- Radiactividad:
- La tasa de descarga de cada nucleido²⁹ importante, y una estimación de la actividad total de descarga en un período específico.
- Propiedades químicas, entre ellas:
 - Las concentraciones de aniones y cationes³⁰, sus estados de oxidación y sus estados complejos (por ejemplo, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4);
 - El contenido orgánico;
 - PH;
 - La concentración de oxígeno disuelto, la conductividad y las concentraciones de contaminantes asociados;
- Propiedades físicas.
 - Temperatura;
 - Densidad;
 - Cargas y granulometría de los sólidos en suspensión;
- Las tasas de descarga de los desechos programados, y una estimación del volumen y frecuencia de descargas accidentales.
- La geometría y la mecánica de los vertidos.

²⁹Un nucleido o núclido es el conjunto de todas aquellas posibles especies nucleares de un elemento químico.

³⁰Los iones cargados negativamente, producidos por la ganancia de electrones, se conocen como aniones (que son atraídos por el ánodo) y los cargados positivamente, consecuencia de una pérdida de electrones, se conocen como cationes (los que son atraídos por el cátodo).

A. Atmósfera

Se debe diseñar un programa de investigación meteorológica, que permita recoger y evaluar continuamente (durante el funcionamiento normal de una planta de energía nuclear) los datos meteorológicos concretos relativos a la dispersión atmosférica, la seguridad de la operación y la confirmación de las bases de diseño de la planta nuclear. También es necesario que dichos datos sean provistos para un período de tiempo suficiente (por lo menos un año completo). Por último es necesario realizar una comparación con los datos recogidos después que la planta ha sido construida, pero antes de que comience su operación, con el fin de determinar si es pertinente hacer cambios en las bases de diseño.

Con respecto a los datos meteorológicos recogidos, es importante tener cuidado con que ellos deben ser compatibles en términos de su naturaleza, alcance y precisión con los métodos y modelos en los que se utilizarán para la evaluación de la exposición a las radiaciones de la población, y el impacto radiológico sobre el medio ambiente. En la recolección de éstos datos meteorológicos, es importante ser cuidadoso al considerar y evitar en las mediciones los efectos locales sobre los valores de los parámetros que deben medirse. Particularmente, es necesario prestar atención a las características del terreno, vegetación y orografía. Las actividades de recopilación de datos deben llevarse a cabo en conformidad con las normas internacionalmente aceptadas, donde debe incluirse al menos datos de un año representativo.

Comparando los datos locales con los actuales y de largo plazo de estaciones meteorológicas colindantes a la zona se puede medir en que grado la información es representativa de largo plazo para la localidad escogida. Es necesario realizar esta tarea porque es importante para la evaluación que los datos representen fielmente el comportamiento meteorológico de largo plazo y no sólo circunstancias específicas de corto plazo. Los datos necesarios para el programa de investigación meteorológica que deben ser obtenidos simultáneamente son:

- Vectores de viento: Es decir, las direcciones del viento y velocidades.
- Indicadores específicos de la turbulencia atmosférica: Directamente tiene que ver con las fluctuaciones en las condiciones meteorológicas; fluctuaciones en la dirección del viento, velocidad del viento a diferentes alturas, temperatura del aire y radiación solar.
- Precipitaciones.
- Temperatura del aire.
- Humedad.
- Presión atmosférica.

Los datos correspondientes a cada uno de estos indicadores son necesarios para evaluar el impacto de estas variables sobre las concentraciones de contaminantes en el aire, el suelo y el agua.

Dado que datos como los del viento y precipitaciones se deben obtener por lo menos cada una hora, es necesario tener instrumentos de medición previstos de grabación continua con el fin de garantizar que la información recogida este fácilmente disponible en los lugares donde se utiliza. Los valores medios de los indicadores derivados del programa de investigación meteorológica deben ser almacenados durante toda la vida de la planta para fines de respuesta a emergencias. De la misma manera el programa regional para la investigación meteorológica y toda la información relativa debe ser documentada para efectos de la evaluación del sitio y diseño, y para su uso en los planes de respuesta ante emergencias.

Para realizar el estudio de la dosis de exposición a materiales radiactivos en la atmósfera se considera necesario evaluar:

- La fuente de descarga de material radiactivo al medio ambiente y su variación en el tiempo;
- Características atmosféricas, físicas y físico-químicas que rigen el transporte, la difusión y la suspensión de materiales radiactivos;
- Las cadenas alimenticias de los seres humanos;
- Las características de la población residente y circulante, incluida sus actividades agrícolas, industriales, recreativas e institucionales.

B. Hidrosfera

Se debe establecer un programa de vigilancia para las aguas superficiales y subterráneas. Este programa tiene como objetivo proporcionar una base de referencia para la evaluar si las condiciones del sitio y las características hidrológicas de la región se han alterado desde la evaluación de campo y antes del comienzo de operación de la planta nuclear. Dicho programa se debe iniciar unos dos años antes de que comience la construcción de la planta nuclear, continuar una vez que haya finalizado la construcción y durante toda la vida de la planta. Por lo tanto, todas las aguas superficiales y subterráneas en el sitio y región deben ser objeto de un muestreo periódico.

La información necesaria para llevar a cabo una evaluación de la exposición de la hidrosfera a los desechos radiactivos, requiere evaluar:

- Características hidrológicas, físicas, físico-químicas y biológicas que rigen el transporte, difusión y la retención de materiales radiactivos.

- Las cadenas alimenticias de los seres humanos.
- La ubicación y las cantidades de agua utilizada para beber y para fines industriales, agrícolas y recreativos.
- La dieta y otros hábitos de la población, incluidos especialmente actividades ocupacionales, tales como la pesca y la práctica de deportes náuticos.

Los datos necesarios para el análisis hidrológico de superficie para una planta de energía nuclear provienen de diferentes fuentes. La actual red hidro-meteorológica generalmente proporciona datos suficientes. Estos, sin embargo, deben ser verificados antes de ser utilizados. Los datos deben ser recogidos desde las distintas fuentes de agua existentes en la región: ríos, estuarios, lagos, mares, océano, embalses artificiales. Para cada uno de ellos es necesario recopilar información principalmente sobre los caudales y las variaciones de éste, sobre las temperaturas del agua y las características de sedimentos presentes, entre otras cosas.

C. Información disponible en Chile

En este apartado, existen tres grandes puntos: los estudios meteorológicos relacionados principalmente con la atmósfera, los estudios hidrográficos y la construcción de planes de emergencia. Las instituciones relacionadas con cada uno de estos temas son:

1. Dirección Meteorológica de Chile

Maneja información sobre todas las variables meteorológicas que se requieren. La descripción de las fuentes de información (instrumentos de medición y estaciones) para las variables relacionadas con el viento, la temperatura y las precipitaciones, se encuentra detallada en el punto 2.1.1.2 de este documento³¹. Con respecto a las otras variables, radiación solar, presión atmosférica y humedad podemos decir lo siguiente:

- a) Radiación solar: tiene 15 estaciones que miden la radiación solar mediante el índice UV-B a lo largo de nuestro país desde Arica a la Antártica. Los instrumentos de los que dispone la Dirección meteorológica son: piranómetro radiación solar global, piranómetro radiación solar reflejada, piranómetro radiación solar difusa, pirheliómetro ángstrom y radiómetro u.v., todos ellos son eléctricos.
- b) Presión atmosférica: Se mide principalmente con los siguientes instrumentos convencionales: microbarógrafo, barómetro aneroide y barómetro mercurial.
- c) Humedad: los instrumentos actualmente utilizado para recoger los datos de esta variable son: cobertizo meteorológico, higrotermógrafo, psicrómetro august.

³¹Específicamente en los puntos 1, 2 y 4 de la sección C. Información disponible en Chile, página 45.

Además de los aparatos nombrados, existen las estaciones automáticas, que toman información de todas las variables necesarias según este punto: temperatura y humedad del aire, presión atmosférica, precipitación, radiación solar, velocidad y dirección del viento, y la radiosonda, que mide presión, temperatura, humedad y viento.

Para conocer las estaciones que miden este tipo de variables, se debe consultar el Catastro de estaciones meteorológicas que se encuentra en la biblioteca de esta institución.

2. Centro Nacional de datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC)

Maneja información hidrográfica y oceanográfica. Entre sus bases de datos incluye una sección de batimetría que es la medición de profundidad de las aguas marinas, lacustres y fluviales. La medición hidrográfica fue incluida a las tareas del cendhoc recién en el año 2005, por lo que aún están en la fase de compliación de datos. Las siguientes etapas serán mantenimiento, catalogamiento y distribución de la información³². Una descripción relacionada con el nivel del mar, complementaria a la aquí entregada aparece en el punto 2.1.1.2 de este documento³³.

3. Dirección General de Aguas (DGA)

Este organismo entrega información hidrográfica referente al nivel del agua en forma de boletines mensuales en línea y que pueden ser descargados de internet³⁴. Específicamente entrega información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas de las principales cuencas del país³⁵.

Esta no es la única información que manejan. Por el formulario de solicitud de información³⁶ nos damos cuenta de que maneja información sobre la calidad de las aguas, las aguas subterráneas, lagos y embalses, fluviométricas, sedimentométricas y meteorológicas. En el anexo 6 mostramos figuras que contienen las estaciones dedicadas a la recolección de información de cada uno de estos datos.

4. Oficina Nacional de Emergencia - Ministerio del Interior (ONEMI)

Esta institución es la encargada de la seguridad civil, y por ende es quién se debe encargar de realizar planes de emergencia en caso instalar una planta de energía nucleoelectrica en nuestro país, para prevenir, responder y recuperarse de cualquier situación de riesgo nuclear. La onemi ya realiza esta tarea, tiene un Plan Nacional de Protección Civil además de los siguientes planes de emergencia:

³²Base de datos batimétricos. CENDHOC.

³³Específicamente en el punto 5 de la sección C. Información disponible en Chile, página 45.

³⁴Disponibles desde Enero del 2005

³⁵<http://www.dga.cl/index.php?option=content&task=category§ionid=16&id=43&Itemid=169>

³⁶<http://www.dga.cl/sig.dga.cl/mupbiu/receiver.php?do=FramesetBNA>

- Sismos
- Volcanes
- Emergencias Químicas
- Incendios Forestales
- Plan de Gestión Incendios Forestales
- Gripe Aviar
- Tsunamis

La onemi además entrega guías para que otros organismos puedan realizar sus planes de emergencia, incluyendo una guía básica para el diseño de éstos:

- Para Comunidades Extranjeras
- ACCEDER: Metodología para la elaboración de planes de Manejo de Emergencias y Contingencias
- AIDEP: Metodología para la Gestión Integral y Participativa de Prevención, Preparación, Respuesta y Recuperación frente a Emergencias y Desastres, de acuerdo a las específicas realidades locales de Riesgos y de Recursos.
- Sistema de Evaluación de Daños y Necesidades DEDOS
- Seguridad en Unidades Laborales
- Guía Estratégica para el Manejo de Riesgos en Colecciones Patrimoniales
- Manual Plan Integral de Seguridad Escolar

De este modo, si otro organismo es quién realizara el plan de emergencia, tiene los lineamientos básicos para ello y además es importante recalcar, que tiene que coordinarse con la ONEMI, el principal agente en materia de seguridad civil.

2.1.2.2. La distribución de la población

Al evaluar la localización para una planta nuclear, se debe determinar la distribución de la población dentro de la región. Los objetivos de estos estudios serán:

- Evaluar los potenciales impactos radiológicos de las descargas radiactivas normales y accidentales; y
- Ayudar a demostrar la factibilidad de un plan de respuesta de emergencia.

En caso de que el sitio en análisis se encuentre cercano a una frontera nacional, será fundamental la cooperación entre países para el intercambio oportuno de información de la planta.

El término “población presente” incluye dos categorías: población permanente y población temporal. Los datos de la población presente en la zona exterior³⁷ deben ser obtenidos de las autoridades locales o por medio de investigaciones especiales en terreno, y deben ser tan exactos y actuales como sea posible. Los datos deben incluir el número de personas que normalmente está presente en el área, y la ubicación de las casas, hospitales, prisiones, escuelas, etc., para considerar en los planes de emergencia.

La información de la población permanente de la región, y de su distribución, debe contener información de la ocupación de la población, lugares de trabajo, medios de comunicación y alimentación típica de los habitantes.

La información de la población temporal debe abarcar:

- la población en tránsito de corto plazo, como turistas y nómades; y
- la población en tránsito de largo plazo, como habitantes de temporada y estudiantes.

Se debe estimar el tamaño máximo de la población temporal y su período de permanencia, tanto en la zona exterior como en el área alrededor de ésta.

Se debe proyectar la población presente en la región para:

- el año en que se espera sea autorizada la planta;
- cada cierta cantidad de años durante la vida útil de la planta.

Las proyecciones se deben hacer en base a la tasa de crecimiento de la población, tendencias migratorias y a planes de posible desarrollo en la región. Las cifras proyectadas para las dos categorías, población permanente y población temporal, deben ser extrapoladas por separado si es que los datos están disponibles.

Los resultados del estudio de las características y la distribución de la población, junto con los resultados obtenidos respecto a la dispersión de material radiactivo en el aire, en aguas superficiales y subterráneas, deben ser usados para demostrar que, para el sitio y diseño propuesto, bajo condiciones normales y también de accidente, la exposición radiológica para la población permanece tan razonablemente baja como sea posible y, en cualquier caso, estará dentro de una serie de límites de requerimientos nacionales y de los establecidos por la IAEA en sus Standards Básicos de Seguridad.

³⁷La zona exterior abarca el área inmediatamente alrededor del sitio de la central nuclear en la cual la distribución, densidad y tasa de crecimiento de la población, la actividad industrial, y el uso de tierras y aguas, son consideradas en relación a la factibilidad de la implementación de medidas de emergencia.

Si, después de una completa evaluación, ésta muestra que no se pueden idear medidas para cumplir con la reglamentación nacional, y no se pueden mejorar las condiciones ingenieriles de seguridad de la planta, el sitio debe ser declarado inapropiado para la central nuclear del tipo propuesto.

Información disponible en Chile

Es el Instituto Nacional de Estadísticas el encargado de llevar el registro de la población en Chile a nivel nacional, regional y comunal, así como también de todas las variables demográficas correspondientes y de realizar proyecciones. Para esto el INE cuenta con los datos del Censo 2002, y toda la información que de este se desprende, clasificada de acuerdo a parámetros geográficos, por sexo, por edad, por factores socioeconómicos y otros.

El principal objetivo estratégico del INE es consolidar el funcionamiento del Sistema Estadístico Nacional y lograr la integración analítica de los sistemas estadísticos económicos, sociales, demográficos, medioambientales y territoriales como parte del rol rector del INE. Para cumplir esta tarea y focalizar su trabajo, el INE cuenta con oficinas regionales en Atacama, Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins, Maule, Bío-Bío, La Araucanía, Los Lagos y Magallanes.

2.1.2.3. Utilización de la tierra y el agua en la región

Como parte de la evaluación del impacto ambiental, se debe investigar el uso de la tierra y el agua. Las características de las tierras y aguas utilizadas en la región deben ser consideradas en la demostración de la factibilidad del plan de respuesta de emergencia.

Las investigaciones deben cubrir:

- tierras dedicadas a uso agrícola, su extensión, las principales cosechas y sus producciones;
- tierras dedicadas a uso ganadero, su extensión y producciones;
- tierras dedicadas a propósitos industriales, institucionales y recreacionales, su extensión y las características de su uso;
- porciones de agua usadas para pesca comercial, individual y recreacional, incluyendo detalles de las especies acuáticas pescadas, su abundancia y producción;
- porciones de agua usadas con fines comerciales, incluyendo navegación, entrega de agua a la comunidad, riego, y fines recreacionales tales como el baño y la marina;
- tierras y aguas que sostengan vida salvaje y ganado;

- vías directas e indirectas para una potencial contaminación radiactiva de la cadena alimenticia;
- productos importados a o exportados desde la región que puedan formar parte de la cadena alimenticia;
- alimentos naturales como hongos, berries y algas

Se deben identificar los usos presentes del agua que podrían ser afectados por cambios en la temperatura de ésta y por material radioactivo descargado desde la planta nuclear.

Una consideración especial se le debe brindar a cualquier centro de población para el cual el agua potable sea obtenida de porciones de agua que puedan ser afectadas por la planta nuclear. Se debe proyectar el flujo de agua futura y los usos del agua para el tiempo de vida útil de la planta.

Para áreas donde el agua potable es obtenida desde las aguas subterráneas, se debe estudiar la calidad y movimiento de éstas.

Para los diferentes usos del agua se deben incluir los siguientes datos:

1. Para el agua usada para beber por humanos y animales, y para fines municipales e industriales:
 - Tasas promedio y máxima de ingesta de agua por los usuarios.
 - Distancia entre el lugar de ingesta y la potencial fuente de descargas radiactivas.
 - Modo de consumo del agua.
 - Número de usuarios del agua.
2. Para el agua usada para riego:
 - Tasa de uso del agua.
 - Área de tierra regada.
 - Tipos y cantidades de productos agrícolas, y sus consumidores habituales.
3. Para el agua usada para pesca:

Las especies acuáticas pescadas, y su abundancia y producciones en el agua usada para pesca comercial, individual y recreacional.
4. Para el agua usada con fines recreacionales:

El número de personas dedicadas al nado, navegación y otros usos recreacionales, y el tiempo utilizado en estas actividades.

Estas investigaciones deben cubrir un área razonablemente grande en la región del emplazamiento. Si una planta nuclear es ubicada en la ribera de un río, se debe identificar a los usuarios río abajo. Si la ubicación es cerca de un lago, se debe identificar a todos los usuarios del lago. Si es cerca de una costa oceánica, se debe identificar a los usuarios hasta a unos diez kilómetros mar afuera en todas las direcciones.

Información disponible en Chile

El INE, mediante el Censo Agropecuario 2007, lleva el registro correspondiente al uso de la tierra y aguas en nuestro país. En este Censo podemos encontrar la siguiente información relevante para nuestro estudio:

- Superficie de las explotaciones agropecuarias con tierra por uso del suelo, según región
- Superficie regada en las explotaciones agropecuarias, año agrícola 2006/2007, por sistemas de riego, según región
- Superficie regada en las explotaciones agropecuarias, año agrícola 2006/2007, por sistemas de riego, según región
- Superficie sembrada, producción y rendimiento de cultivos industriales, en riego y seco, según región y especie
- Existencia de ganado en las explotaciones agropecuarias y forestales por especie, según región

Para lo que es el uso de las aguas, el INE también lleva otras estadísticas aparte de lo referente al Censo Agropecuario, estas dicen relación principalmente con el consumo humano de agua.

También respecto al agua, es del mismo modo importante el trabajo que realiza la Dirección General de Aguas (DGA), y la incipiente labor desempeñada por la Subsecretaría de Marina en miras a lograr la zonificación del borde costero para el Bicentenario en el año 2010, esto mediante el trabajo que están realizando las Comisiones Regionales de Uso del Borde Costero (CRUBC) y las Oficinas Técnicas Regionales de Borde Costero (OFTEC).

Se puede concluir que, a pesar de que la información al respecto aumenta cada vez más, aún harían falta estudios específicos al sitio bajo evaluación para la instalación de una planta nuclear, ya que los datos disponibles se encuentran clasificados principalmente de acuerdo a cada región del país. Para esto será un gran aporte el trabajo que se está realizando respecto a la zonificación del borde costero.

2.1.2.4. La radiactividad ambiente

Antes de autorizar la instalación de una planta nuclear se debe calcular la radiactividad ambiental de la atmósfera, hidrósfera, litósfera y biota en la región para así poder determinar los efectos de la instalación. Los datos obtenidos son proyectados para usarlos como base de comparación en futuras investigaciones.

Información disponible en Chile

A través de su Sección de Vigilancia Radiológica Ambiental, del Departamento de Protección Radiológica y Ambiental, de la CCHEN, este organismo se encarga de medir y evaluar periódicamente los niveles de radiactividad en el medio-ambiente nacional.

Los servicios de análisis radiológico prestados por esta Sección de la CCHE incluyen³⁸:

- Análisis radiológico a frotis y soluciones correspondientes a pruebas de fuga y test de inmersión de equipos nucleares y fuentes radiactivas selladas.
- Análisis de agua según NCh-409/1 por requisitos radiactivos.
- Determinación de Dosis Indicativa Total, de acuerdo a la Norma Técnica PAC/NT4- sernapesca
- Análisis radiológico de diversos productos a solicitud de empresas nacionales.
- Certificación radiológica de alimentos, aditivos alimenticios y productos para exportación.
- Análisis radiológicos a muestras provenientes de otras secciones de la CCHEN.

Concluyendo, es, claramente, la CCHEN, quien actúa como referente técnico en servicios especializados de análisis radiológicos en nuestro país, contando con el personal y equipamiento que serían necesarios para medir la radiactividad ambiental antes de la instalación de una planta nuclear en Chile.

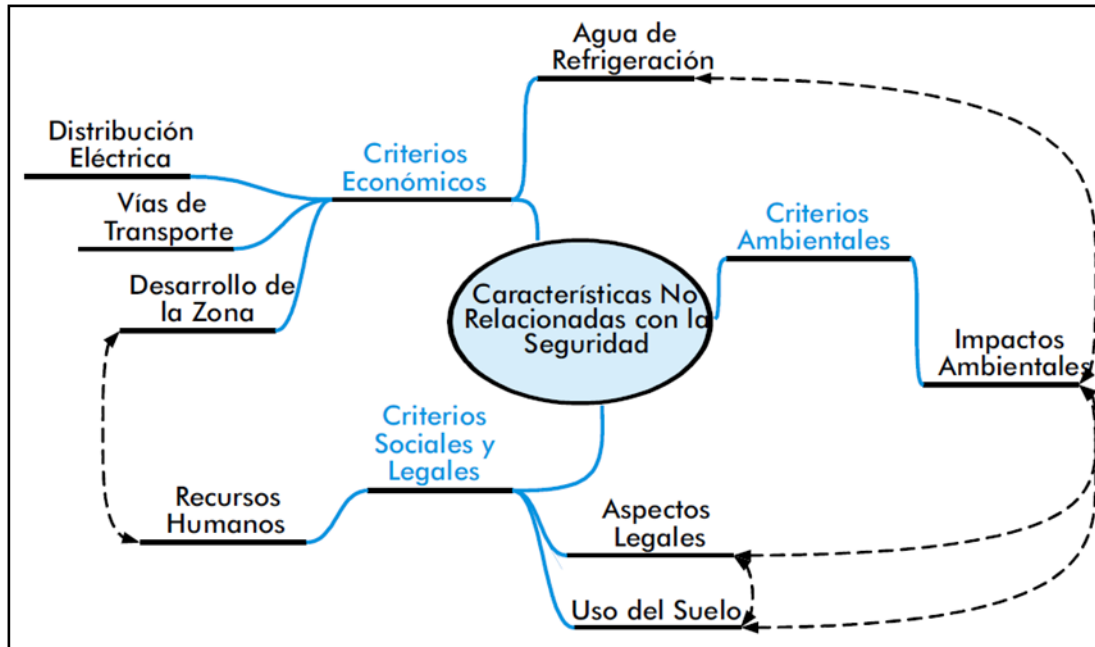
2.2. Aspectos no relacionados con la seguridad

No sólo la seguridad es importante, también deben considerarse los aspectos que tengan que ver con la viabilidad técnica económica de la instalación de una planta de energía nuclear. Para definir los conceptos relevantes a analizar nos basamos en la experiencia Argentina que define el estudio de esta viabilidad en base en tres criterios fundamentales: económicos, ambientales y sociales y legales. Dentro de cada uno de ellos se desarrollan

³⁸Fuente: <http://www.cchen.cl>

ítems que se interrelacionan entre sí tal como se muestra en la siguiente figura 2.7 y que nosotros desarrollamos en esta sección de nuestro trabajo.

Figura 2.7: Características de los emplazamientos no relacionados con seguridad



Fuente: Estudios de localización para el emplazamiento de nuevas centrales nucleares en Argentina, página 12.

2.2.1. Transmisión eléctrica

La transmisión eléctrica “corresponde al conjunto de líneas, subestaciones y equipos destinados al transporte de electricidad desde los puntos de producción (generadores) hasta los centros de consumo o distribución.”³⁹ Por esto, es importante considerar la distancia del reactor con la red de distribución eléctrica, específicamente con el sistema troncal que es el “conjunto de líneas y subestaciones que configuran el mercado común” desde donde los sistemas de subtransmisión retiran la energía para trasladarla a los puntos de consumo.⁴⁰

Cada reactor no puede tener una potencia superior al 10% de la red a la que está conectado para garantizar la estabilidad de esta última frente a una suspensión del suministro⁴¹. Tal como se mencionó en “El mercado eléctrico en Chile” en la página 6, existen en nuestro país cuatro sistemas interconectados. En este punto nos interesa analizar entonces la capacidad instalada de cada red para ver en cual de ellas podríamos conectar un reac-

³⁹Definición extraída de la Comisión Nacional de Energía: http://www.cne.cl/electricidad/f_sistemas.html

⁴⁰Fuente: Comisión Nacional de Energía: http://www.cne.cl/electricidad/f_sistemas.html

⁴¹Fuente: Informe Zanelli

tor nuclear. La tabla 2.3 vemos la capacidad instalada de los sistemas interconectados en nuestro país y la cantidad de potencia que equivale al 10% de ésta.

Cuadro 2.3: Potencia a diciembre 2007

Sistema	Capacidad instalada (MW)	10% de la capacidad
SING	3.601,90	360,19
SIC	9.118,20	911,82
Aysén	33,5	3,35
Magallanes	79,6	7,96

Elaborado en base a datos de la CNE

El reactor más pequeño conectado a una red para la producción de energía eléctrica es de 130 MW. Este corresponde al reactor Phenix del tipo FBR ubicado en Francia. Por otra parte el más pequeño entre los reactores del tipo PHWR, el más común, es de 202 MW. Hay siete de ellos, todos ubicados en India.⁴²Dado esto, un reactor se podría instalar en el SING o en el SIC. En el anexo 7 presentamos un mapa del SING y en el 8 del SIC donde se muestran los sistemas de transmisión incluyendo las centrales, subestaciones y nudos.

2.2.2. Vías de transporte

El acceso a vías de transporte es clave en la elección de localización de una central de energía nuclear ya que tanto por factores económicos como de seguridad es imprescindible contar con un buen acceso a ellas desde las etapas más tempranas de la planificación y diseño de una central nuclear.

Por vías de transporte se entiende toda la infraestructura que permite acceder al sitio de la planta tanto a los materiales de construcción, como el personal y el combustible, además de servir de acceso a instituciones de emergencia como bomberos, ambulancias u otros en la eventualidad de un accidente.

Entre las principales vías podemos mencionar:

- Puertos: La mayor parte del transporte industrial se realiza vía mar, y como los componentes necesarios para la construcción y operación de la planta no serían la excepción es necesario contar con puertos que puedan soportar estándares superiores de seguridad y calidad.
- Caminos: Deben tener un estándar de calidad que permita el transporte de materiales pesados además de ser capaz de soportar procedimientos de seguridad como los necesarios para el transporte del combustible nuclear. Deben ser expeditos y conectar directamente con instituciones de emergencia, y puertos.

⁴²Fuente: Tabla 14, Nuclear Power Reactors in the World.

- Aeropuertos: Principalmente debe existir acceso para el personal calificado que requiere la planta, el que generalmente es contratado en el exterior al ser altamente especializado.

Además de la necesidad de la existencia de esas vías es importante que en la decisión de localización sean considerados los factores económicos relacionados con el transporte ya que puede significar una ventaja si se elige correctamente. Además deben existir proyecciones futuras con el fin de analizar la posibilidad de eventualmente crear economías de escala al instalar otras centrales o instalaciones relacionadas.

2.2.3. Recursos humanos

El personal necesario para operar una central nuclear varía de 200 a 1000 personas⁴³ que incluye una variedad de científicos e ingenieros y técnicos en los campos necesarios para operar y mantener la planta de manera eficaz como ingeniería nuclear, instrumentación y control, ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica, protección de radiación, química, preparación para casos de emergencia y análisis de la seguridad y evaluación. Se requiere que cada una de estas personas tengan tres años o más de formación y experiencia especializada antes de la carga inicial de combustible de una central nuclear (esto se puede incluir en los contratos de las personas para que se incluya dentro de este, el periodo de formación y experiencia).

Se necesitan además expertos que apoyen la organización y el funcionamiento de la central nuclear en las áreas física, termohidráulica, neutrones, protección contra las radiaciones, gestión de residuos radiactivos, calidad de gestión y mantención y gestión de repuestos.

En la organización se debe trabajar con temas de cultura, ética y disciplina, para garantizar la seguridad incluyendo consideraciones de no-proliferación.

Situación en nuestro país Hay 631 operadores vigentes en los Centros de Estudios Nucleares de La Reina y Lo Aguirre que tiene la CCHEN⁴⁴, cada uno con un propósito específico.

Para operar una central nucleoelectrica se requieren más especialistas. Se debe analizar en detalle la situación académica de nuestro país para motivar a los potenciales expertos en temas nucleares para que sigan ese rumbo.

⁴³Fuente: Considerations to launch a nuclear power programme, pág. 7.

⁴⁴Fuente: Operadores vigentes 2008 - CCHEN

2.2.4. Aspectos legales y uso del suelo

En la localización de una planta nuclear, los aspectos técnicos y económicos se deben complementar con los legales e institucionales. Respecto a este tema se hace imperioso contar con instrumentos legales y una institucionalidad sobre ordenamiento territorial acorde con lo delicado del tema.

El sector eléctrico chileno se rige por normas legales contenidas en el DFL N° 1 “Ley General de Servicios Eléctricos” y por el Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos Decreto Supremo N° 327.

- La ley 19.940 (llamada ley corta) define quien debe pagar los peajes o los costos de transmisión según el tamaño de central generadora.
- La ley 20.018 (ley corta II) establece el sistema de licitación a que se deben sujetar las concesionarias de servicios públicos de distribución. Se establece un precio tope para las ofertas en el proceso de licitación.
- La ley 16.319 (1965) define y crea la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), junto con su naturaleza jurídica y orgánica. Además define energía nuclear o energía atómica como la generada por procesos o fenómenos nucleares, tales como la fisión y la fusión nuclear y la emisión de partículas y de radiaciones.
- La ley 18.302, modificada con la ley 19.825, es de seguridad nuclear donde da atribuciones fiscalizadoras a la CCHEN.

También existen una serie de reglamentos orientados al transporte de materiales radiactivos, de protección radiológica y autorización de instalaciones nucleares o equipos que emiten radiaciones ionizantes.

- La ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, entre otros instrumentos, establece exigencias medioambientales a todos aquellos proyectos o actividades que sean susceptibles de causar impacto ambiental. Según ésta, los proyectos de generación eléctrica con capacidad superior a 3 MW deben presentar el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). También se someten a evaluación de impacto a reactores y establecimientos nucleares e instalaciones relacionadas.

En Chile no existe legislación para todas las actividades que afectan la seguridad de una central, tales como la elección de sitio, diseño, construcción, licenciamiento, operación y desmantelamiento.

El proceso de licenciamiento es similar en muchos países donde éstas son supervisadas por los organismos reguladores y deben incluir las siguientes etapas:

1. Autorización de la construcción y elección de sitio.
2. Construcción
3. Autorización de Explotación

En conclusión, para el establecimiento de una planta nuclear, donde sea que ésta se ubique, harán falta cambios legales, ya que el DFL 1 no sería el instrumento adecuado para permitir la generación núcleo-eléctrica, y la creación de nuevas instituciones. Esto incluye el establecimiento de normas de emisión que hoy día no existen; la creación de organismos de seguridad y revisores de los desechos y la creación de una entidad reguladora.

Con respecto al uso de suelos, podemos decir que éste está referido a la ocupación del territorio ya sea por actividades antrópicas (urbanas y rurales), ambientes naturales, o bien por la combinación de ellos. Éstos se pueden caracterizar por aquellos espacios territoriales normados, regidos por los Instrumentos de Planificación Territorial y los usos de suelo actual, que corresponden a los usos de suelo existentes en sí, dentro del área estudiada.

Atendiendo a las disposiciones normativas emanadas de la Ley General de Urbanismo y Construcciones y su respectiva Ordenanza, la planificación territorial en Chile se estructura a partir de cuatro niveles de acción.

Desde la escala de planificación nacional (nivel de mayor jerarquía), se establecen una serie de preceptos y lineamientos estratégicos acogidos por los siguientes tres niveles de acción; regional, intercomunal y comunal. Lo anterior se estructura, a partir de los Instrumentos de Planificación Territorial de acuerdo a:

- Nivel Regional: Instrumento de Planificación; Plan de Desarrollo Urbano (PDU).
- Nivel Intercomunal: Instrumento de Planificación; Plan Regulador Intercomunal.
- Nivel Comunal: Instrumento de Planificación; Plan Regulador Comunal (PRC), Planes Seccionales y Límite Urbano, de jerarquía inferior a los Planes Reguladores Comunales.

Los instrumentos de planificación territorial antes señalados, cumplen con la función de establecer un marco indicativo y/o normativo de los usos de suelo a cada una de las escalas territoriales de aplicación.

2.2.5. Acceso a fuente de enfriamiento

En el proceso de fisión de uranio se libera gran cantidad de energía y calor es por esto que es necesario un sistema de extracción de energía o sistema de enfriamiento para transportar el calor producido. Normalmente es utilizado agua que se extrae de los cursos hídricos cercanos.

Por lo tanto dentro de los parámetros a considerar en el emplazamiento de una central nuclear es necesario evaluar el acceso a un recurso hídrico para utilizarla como fuente de enfriamiento.

Una vez elegido el sitio se deben determinar el potencial de accidente y/o eventos naturales o por acción de hombre que podrían causar pérdida de función de los sistemas para eliminación del calor: bloqueo o desvío de un río, agotamiento de un embalse, cantidad excesiva de organismos marinos, bloqueo de un depósito o torre de refrigeración, congelación por formación de hielo, colisiones con embarcaciones, derrames de petróleo e incendios. Si los riesgos o las probabilidades de ocurrencia son mayores a las aceptadas, el sitio se considerará inadecuado.

Tanto para la elección del sitio como para asegurar el funcionamiento continuo del sistema de enfriamiento es necesario realizar seguimientos al recurso hídrico a utilizar, para ello se puede considerar:

- Estudios de temperatura del aire y la humedad;
- Estudios de temperatura del agua, flujo libre del agua, nivel de agua mínimo y periodos de tiempo de esos niveles mínimos para la seguridad del enfriamiento;

Información para la elección de una fuente en Chile

Para la evaluación del acceso a la fuente en frío en Chile, el organismo que debería estar encargado de proporcionar la información es la DGA, por ser el organismo autorizado de promover la gestión y administración de los recursos hídricos del país. Para esto cuenta con el Servicio Hidrométrico Nacional y el Banco Nacional de Aguas que está encargado de la investigación, medición, vigilancia y catastro de los recursos hídricos.

En el punto de riesgo por inundaciones se comentó sobre la información estadística generada por el DGA que es de carácter Fluvimétrica, Meteorológica, Pluviométrica, Calidad de Aguas, Aguas Subterráneas, Sedimentométricas y Georeferenciada.

Por lo tanto, creemos que la información disponible en la DGA podría ser suficiente para al menos elegir prospecto de recursos hídricos para utilizarlos como fuente de enfriamiento para una central nucleoelectrónica en Chile, además de generar los informes de seguimiento para evaluar la capacidad de continuidad y estabilidad del recurso.

2.2.6. Impactos ambientales

Impacto ambiental es la alteración que se produce en el ambiente cuando se lleva a cabo un proyecto o una actividad. El impacto puede ser favorable o desfavorable para el medio ambiente.

Antes de empezar un proyecto de una central nuclear que pueden producir impactos importantes en el ambiente, la legislación deberá obligar a hacer una Evaluación del Impacto Ambiental, con la finalidad de identificar, predecir e interpretar los impactos que esa actividad producirá si es ejecutada.

El estudio de Impacto Ambiental es un investigación que realizan técnicos especializados identificando los impactos, la posibilidad de corregirlos, los efectos que producirán, etc. Debe ser lo más objetivo posible, sin interpretaciones ni valoraciones, sino recogiendo datos. Es un estudio multidisciplinar por lo que tiene que fijarse en cómo afectará al clima, suelo, agua; conocer la naturaleza que se va a ver afectada: plantas, animales, ecosistemas; los valores culturales o históricos, etc.; analizar la legislación que afecta al proyecto; ver cómo afectará a las actividades humanas: agricultura, vistas, empleo, calidad de vida, etc.

En los impactos ambientales hay que tener en cuenta y debe ser evaluado lo siguiente:

- Signo: si es positivo y sirve para mejorar el medio ambiente o si es negativo y degrada la zona.
- Intensidad: según la destrucción del ambiente sea total, alta, media o baja.
- Extensión: según afecte a un lugar muy concreto y se llama puntual, o a una zona algo mayor -parcial-, o a una gran parte del medio -impacto extremo- o a todo -total-. Hay impactos de ubicación crítica: como puede ser un vertido en un río poco antes de una toma de agua para consumo humano: será un impacto puntual, pero en un lugar crítico.
- El momento en que se manifiesta e impacto latente que se expresará con el correr del tiempo. Otros impactos son inmediatos o a corto plazo.
- Persistencia: Se dice que es fugaz si dura menos de 1 año; si dura de 1 a 3 años es temporal y pertinaz si dura de 4 a diez años. Si es para siempre sería permanente.
- Recuperación: Según sea más o menos fácil de reparar el impacto distinguimos, irrecuperables, reversibles, mitigables, recuperables, etc.
- Suma de efectos: A veces la alteración final causada por un conjunto de impactos es mayor que la suma de todos los individuales y se habla de efecto sinérgico. Así, por ejemplo dos carreteras de montaña, pueden tener cada una su impacto, pero si luego

se hace un tercer tramo que, aunque sea corto, une las dos y sirve para enlazar dos zonas antes alejadas, el efecto conjunto puede ser que aumente mucho el tráfico por el conjunto de las tres. Eso sería un efecto sinérgico.

- Periodicidad. Distinguimos si el impacto es continuo como una cantera, por ejemplo; o discontinuo como una industria que, de vez en cuando, desprende sustancias contaminantes o periódico o irregular como los incendios forestales.

Evaluación Impacto Ambiental en Chile

En Chile, según Ley de Bases Generales del Medio Ambiente establece como responsabilidad de la CONAMA, actuar como un servicio de consulta, análisis, comunicación y coordinación en materias relacionadas con el medio ambiente.

Para efectos de este seminario consideraremos dos de sus principales funciones.

La primera es la elaboración de normas ambientales, planes de prevención y descontaminación; y generación de instrumentos de gestión orientados a la recuperación de la calidad ambiental en el país.

La segunda función corresponde a la administración del Sistema de Evaluación de Impacto ambiental (SEIA) con la cual introducen la dimensión ambiental en el diseño, ejecución, seguimiento y fiscalización de proyectos o actividades que realice el país. La CONAMA a través de la Dirección Ejecutiva o las Comisiones Regionales del Medio Ambiente (COREMA), coordina los procesos de evaluación ambiental de los proyectos o actividades que se someten al SEIA. A dicha evaluación son convocados los órganos del Estado con competencia ambiental quienes emiten sus respectivos pronunciamientos.

Por lo tanto, estas función la consideramos cruciales, puesto que en Chile no existe un marco jurídico para el correcto funcionamiento de una central nucleoelectrica por lo tanto la función y rol que debiera tener la CONAMA será de mucha importancia para ayudar a generar el marco legal para la evaluación y seguimiento del impacto ambiental de una central nuclear en el territorio chileno.

Conclusiones

Durante el desarrollo de nuestro Seminario de Título sobre el estudio de localización de una central nucleoelectrónica hemos obtenido tanto conclusiones que guardan relación directa con nuestro objetivo principal, como otras que no por accesorias se les puede considerar menos relevantes de ser consignadas.

En la descripción de los antecedentes generales y contextuales hemos mostrado que es completamente justificable evaluar la generación nuclear como una alternativa a las fuentes utilizadas actualmente, ya que permite diversificar la matriz con una tecnología que se presenta como competitiva en aspectos como el costo de generación o las emisiones de gases de efecto invernadero, considerando también el especial cuidado que merecen temas como el manejo de los residuos radioactivos y el compromiso de largo plazo a nivel país requerido debido a los altos costos de construcción de las centrales y los requisitos que deben ser cumplidos por el país antes de poder operar ésta tecnología.

Con respecto a nuestro objetivo central, el estudiar la localización de una planta en Chile hemos encontrado que dada la complejidad de la decisión se deben realizar estudios específicos que superan los alcances del presente documento con el fin de garantizar que todos los parámetros relevantes sean considerados en la evaluación.

La conclusión principal que obtuvimos es que si bien, a nivel de la información necesaria para apoyar la decisión de emplazamiento, el país cuenta con instituciones que tienen como misión recolectar información relevante que podría servir como fuente al estudio de los diversos factores que involucran la localización, se debe evaluar la calidad y pertinencia de ésta, con el fin de detectar la necesidad de datos o estudios adicionales, además de construir modelos que permitan proyectar los datos en el futuro y crear escenarios que permitan descartar sitios por presentar riesgo potencial muy alto o tomar medidas que permitan hacer frente a contingencias.

La evaluación del sitio debe contemplar todos los efectos posibles, tanto positivos como negativos, que la planta pueda tener sobre su entorno, desde la etapa de construcción hasta la operación, incluyendo los efectos de accidentes y otros eventos que potencialmente pudiesen afectar operación segura y eficiente de la central.

El proceso que contempla todos los pasos y requisitos previos a la entrada en funcionamiento de una central nucleoelectrica, en conjunto con el tiempo que tal proceso representa hace necesario que la planificación energética sea de largo plazo con el fin de que todas las evaluaciones puedan ser realizadas con el tiempo necesario para garantizar su validez y confiabilidad.

Bibliografía

- [1] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. [en línea]
<<http://www.iaea.org/>>
[consulta: Octubre a Diciembre 2008]

- [2] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. Dispersion of Radioactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in Site Evaluation for Nuclear Power Plants Safety Guide [en línea] Safety Standars Series No. NS-G-3.2. Tuesday, 23 April, 2002.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1122_scr.pdf>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]

- [3] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. External Human Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants Safety Guide. [en línea] Safety Standars Series No. NS-G-3.1. Friday, 19 July, 2002.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1126_scr.pdf>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]

- [4] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants Safety Guide. [en línea] Safety Standars Series No. NS-G-3.3. Friday, 21 March, 2003.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1144_web.pdf>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]

- [5] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Meteorological Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants Safety Guide. [en línea] Safety Standars Series No. NS-G-3.4. Wednesday, 16 July, 2003.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1148_web.pdf>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]

- [6] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. Site Evaluation for Nuclear Installations Safety Requirements. [en línea] Safety Standars Series No. NS-R-3. Friday, 19 December, 2003.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1177_web.pdf>
[consulta: Octubre a Diciembre 2008]
- [7] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Flood Hazard for Nuclear Power Plants on Coastal and River Sites Safety Guide. [en línea] Safety Standars Series No. NS-G-3.5 Thursday, 18 March, 2004.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1170_web.pdf>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [8] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants Safety Guide. [en línea] Safety Standars Series No. NS-G-3.6. Friday, 01 April, 2005.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1195_web.pdf>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [9] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. Considerations to launch a nuclear power programme. [en línea]. 2007.
<<http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Downloads/files/Considerations.pdf>>
[consulta: Diciembre 2008]
- [10] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2030. [en línea] Reference data series No. 1. 2008.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS1-28_web.pdf>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [11] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. Nuclear Power Reactors in the World. [en línea] Reference Data Series No.2. 2008.
<<http://www.iaea.org/programmes/a2/>>
[consulta: 13 de diciembre 2008]
- [12] AGUILAR, JOSÉ RAMÓN. Tornados y Terremotos: Escalas, Portal de Medicina de Emergencias, [en línea]
<<http://www.medynet.com/usuarios/jraguilars/tornados%20y%20terremotos.pdf>>
[consulta: Noviembre y Diciembre 2008]

- [13] ANTONIJEVIC I., BAEZA R., ECHEVERRÍA C., GAMBARDELLA C., INFANTE P., JADRESIC A., JOFRÉ A., STUTZIN A., TENREIRO C., ZANELLI J. La opción nucleo-eléctrica en Chile. [en línea] Septiembre 2007.
<http://www.minrel.gov.cl/prontus_minrel/site/artic/20080814/asocfile/20080814143214/informe.pdf>
[consulta: Agosto a Diciembre 2008]
- [14] CALVO YÁÑEZ, GONZALO. Estudio exploratorio de una central nuclear en el sistema interconectado central. Memoria (Título de Ingeniero Civil Industrial). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2007.177h.
- [15] CENTRO DE DESPACHO ECONÓMICO DE CARGA DEL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL. Mapa del SIC. [en línea] Abril, 2008.
<https://www.cdec-sic.cl/imagenes/contenidos/File/documentos/mapa_sic.pdf>
[Consulta: 10 al 13 de Diciembre 2008]
- [16] CENTRO NACIONAL DE DATOS HIDROGRÁFICOS Y OCEANOGRÁFICOS DE CHILE (cendhoc) [en línea]
<http://www.shoa.cl/index_cendhoc.html>
[Consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [17] COMISIÓN CHILENA DE ENERGÍA NUCLEAR. [en línea]
<<http://www.cchen.cl>>
[Consulta: 9 de Diciembre de 2008]
- [18] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA) [en línea]
<<http://www.conama.cl/portal/1301/channel.html>>
[Consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [19] COMISIÓN CHILENA DE ENERGÍA NUCLEAR. Operadores vigentes 2008. [en línea] 2008.
<http://www.cchen.cl/mediateca/PDF/dsnr/operadores_vigentes_actual.pdf>
[consulta: 15 de Diciembre 2008]
- [20] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. [en línea]
<<http://www.cne.cl/>> [consulta: Julio a Diciembre 2008]
- [21] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA, Anuario Estadísticas sector Energía 2007 [En línea]
<<http://www.cne.cl/estadisticas/anuario/index.html>>
[Consulta: 6 de Diciembre 2008]

- [22] CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR. Primer Ejercicio, Grupo B, Tema 9: Reactores Nucleares. Componentes. Tipos. 2008 [en línea]
<http://www.csn.es/descarga/2008_Primer_B_9.pdf>
[Consulta: 12 de Diciembre de 2008]
- [23] CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR. Primer Ejercicio, Grupo C, Tema 3: Selección y evaluación de emplazamientos nucleares. Parámetros del emplazamiento. Criterios. Evaluación permanente. 2008 [en línea]
<http://www.csn.es/descarga/2008_Primer_C_3CENDHOC.pdf>
[Consulta: 12 de Diciembre de 2008]
- [24] DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA (DGF) DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS (FCFM) DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE. Atmósfera, Meteorología Interactiva[en línea]
<<http://www.atmosfera.cl/>>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [25] DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL [en línea]
<<http://www.dgac.cl/>> [Consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [26] DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. [en línea]
<<http://www.dga.cl/>> [Consulta: Diciembre 2008]
- [27] DIRECCIÓN GENERAL DE MOVILIZACIÓN NACIONAL [en línea]
<<http://www.dgmn.cl/>> [Consulta: Diciembre 2008]
- [28] DIRECCIÓN METEOROLOGICA DE CHILE [en línea]
<<http://www.meteochile.cl/>>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [29] DIRECCIÓN METEOROLOGICA DE CHILE.
Tornados, Documentos de Ayuda al Estudiante. [en línea]
<<http://www.meteochile.cl/>> [Consulta: Diciembre 2008]
- [30] EMPRESAS INTEGRANTES DEL CDEC-SING. Estadísticas de Operación 1998/2007. [en línea]
<http://suse-sing.cdec-sing.cl/html_docs/anuario2007/PDF/CDEC-SING%202007%20Esp.pdf>
[consulta: 10 al 13 de Diciembre 2008]
- [31] FUERZA AÉREA DE CHILE [en línea]
<<http://www.fach.cl/>> [Consulta: Diciembre 2008]

- [32] GIRON, JORGE Y OTONIEL MATÍAS, Pequeño Tsunami (Seiche) en la Bahía de Santiago, Lago de Atitlán, Sololá, Guatemala. [En línea]
 <www.insivumeh.gob.gt/folletos/Pequeno_Tsunami_en_la_Bahia_de_Santiago_Atatlan.pdf>
 [consulta: Diciembre 2008]
- [33] GRUPO DE GEOTECNIA. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. [en línea]
 <<http://icc.ucv.cl/geotecnia/index.htm>> [Consulta: 13 de Diciembre de 2008]
- [34] GUSTAVO ANDRÉS BARBARÁN. Estudios de localización para el emplazamiento de nuevas centrales nucleares en Argentina. [s.a.] [en línea] Boletín Energético n°19.
 <<http://www.cnea.edu.ar/xxi/energe/b19/B19art2.pdf>>
 [consulta: Diciembre 2008]
- [35] INE. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. [en línea]
 <<http://www.ine.cl>> [Consulta: 9 de Diciembre de 2008]
- [36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Comparing Energy Options, Publications. [En línea]
 <<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull401/article1.html>>
 [Consulta: 11 Octubre].
- [37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series, 2002 [En línea]
 <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1144_web.pdf>
 [Consulta: 8 de Diciembre 2008]
- [38] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, External Human Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series, 2002 [En línea]
 <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1126_scr.pdf>
 [Consulta: 8 de Diciembre 2008]
- [39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030. Reference Data Series N°1. Vienna, 2008 [en línea]
 <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS1-28_web.pdf>
 [consulta Octubre a Diciembre 2008]

- [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Latest News Related to Prís and the Status of Nuclear Power Plants. 2008 [en línea]
<<http://www.iaea.org/programmes/a2/>>
- [41] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050, 2006.
- [42] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Energy Technology Essentials: Nuclear Power, 2007.
- [43] NUCLEAR ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, OECD, Projected Costs of Generating Electricity, 2005 Update.
- [44] OFICINA NACIONAL DE EMERGENCIA. [en línea]
<<http://www.onemi.cl/>>
[Consulta 14 y 15 de Diciembre 2008]
- [45] PALACIOS, JAVIER “ET AL”, Levelized Costs for Nuclear, Gas and Coal for Electricity, Under the Mexican Scenario, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México, 2004.
- [46] REVISTA AREA MINERA, Hallazgo de uranio en Región del Bío Bío abre posibilidades para la nucleoelectricidad. Abril, 2008 [en línea]
<http://www.aminera.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=9366&Itemid=2>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [47] RUCHKIN, S. Y LOGINOV, V. Garantizar el ciclo del combustible nuclear: ¿Cuál es la próxima etapa?, IAEA Bulletin Volume 48, N°1. Septiembre, 2006. [en línea]
<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull481/pdfs/Spanish/article7_sp.pdf>
[Consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [48] SEMINARIO ENERGÍA NUCLEAR. Lo que hay que Saber y Hacer... antes de Tener. AmCham, Expansiva y Libertad y Desarrollo. Santiago, Chile, 2008 [En línea]
<<http://www.amchamchile.cl/node/5101/>>. [Consulta: Noviembre 2008]
- [49] SERNAGEOMIN. Servicio Nacional de Geografía y Minería. [en línea].
<<http://www.sernageomin.cl>>
[Consulta: 9 de Diciembre de 2008]
- [50] SERNAGEOMIN, Mapa Geológico de Chile: Versión digital, 2003

- [51] SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA DE CHILE. [en línea]
<<http://www.shoa.cl/>>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [52] SERVICIO METEOROLÓGICO DE LA ARMADA DE CHILE [en línea]
<<http://www.directemar.cl/meteo/>>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [53] SERVICIO SISMOLÓGICO DE CHILE [en línea]
<<http://www.sismologia.cl/>>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [54] SISTEMA NACIONAL DE ALARMA DE MAREMOTOS (SNAM) [en línea]
<http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/snam_n.htm>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [55] TARJANNE, R., RISSANEN, S., Nuclear Power: Least-Cost Option for Baseload Electricity in Finland, 2000
- [56] Terremotos y otros desastres naturales [en línea]
<<http://www.angelfire.com/co2/elbows2/>>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [57] TÚTIEMPO.NET [en línea]
<<http://www.tutiempo.net/foros/index.php?action=vthread&forum=1&topic=585>>
[Consulta: Diciembre 2008]
- [58] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Waste Management, Education Papers 2007 [En línea]
<<http://www.world-nuclear.org/education/wast.htm>>
[Consulta: 9 de Diciembre 2008]
- [59] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, The Economics of Nuclear Power, Information Papers 2008 [En línea]
<<http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>>
[Consulta: 17 Octubre 2008].
- [60] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Uranium Markets. Marzo, 2008. [en línea]
<<http://www.world-nuclear.org/info/inf22.html>>
[Consulta: Noviembre y Diciembre 2008]

- [61] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Supply of Uranium. Junio, 2008 [en línea]
<<http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>>
[Consulta: Noviembre y Diciembre 2008]
- [62] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, Uranium Production Figures. Julio, 2008. [en línea]
<<http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html>>
[Consulta: Noviembre y Diciembre 2008]

Anexos

Anexo 1: Plantas operativas y en construcción por país

El siguiente cuadro muestra las la cantidad de unidades y el total de MW(e) de plantas nucleares operativas al 29 de octubre del 2008, los mismos datos para las que están en construcción a la fecha, y el porcentaje del total de la electricidad utilizada, abastecida con energía nuclear durante el 2007, por país. En la última fila aparecen estos datos a nivel mundial, es decir, la cantidad y el total de MW (e) que generan o generarán, las plantas en operación y en construcción, y el promedio del porcentaje del total de electricidad en el mundo.

Ubicación		En operación		En construcción		Porcentaje del total de electricidad
País	Continente	N ° de unidades	Total MW (e)	N ° de unidades	Total MW (e)	
1 SUDÁFRICA	ÁFRICA	2	1.800			5,5%
2 CANADÁ	AMÉRICA DEL NORTE	18	12.621			14,7%
3 ESTADOS UNIDOS		104	100.582	1	1.165	19,4%
4 MÉXICO		2	1.360			4,6%
5 ARGENTINA	AMÉRICA DEL SUR	2	935	1	692	6,2%
6 BRASIL		2	1.795			2,8%
7 CHINA	ASIA	17	13.359	8	7.820	1,9%
8 COREA		20	17.451	4	3.840	35,3%
9 INDIA		17	3.782	6	2.910	2,5%
10 IRÁN		1	915			
11 JAPÓN		55	47.587	2	2.191	27,5%
12 PAKISTÁN		2	425	1	300	2,3%
13 RUSIA		31	21.743	8	5.809	16,0%
14 ALEMANIA	EUROPA	17	20.470			27,3%
15 ARMENIA		1	376			43,5%
16 BÉLGICA		7	5.824			54,0%
17 BULGARIA		2	1.906	2	1.906	32,1%
18 ESLOVAQUIA		5	2.034			54,3%
19 ESLOVENIA		1	666			41,6%
20 ESPAÑA		8	7.450			17,4%
21 FINLANDIA		4	2.696	1	1.600	28,9%
22 FRANCIA		59	63.260	1	1.600	76,8%
23 HUNGRÍA		4	1.829			30,2%
24 LITUANIA		1	1.185			64,4%
25 PAÍSES BAJOS		1	482			4,1%
26 REINO UNIDO		19	10.222			15,1%
27 REPÚBLICA CHECA		6	3.619			36,8%
28 RUMANIA		2	1.300			13,0%
29 SUECIA		10	9.014			46,1%
30 SUIZA		5	3.220			40,0%
31 UCRANIA	15	13.107	2	1.900	48,1%	
TOTALES		439	372.100	38	32.648	27,1%

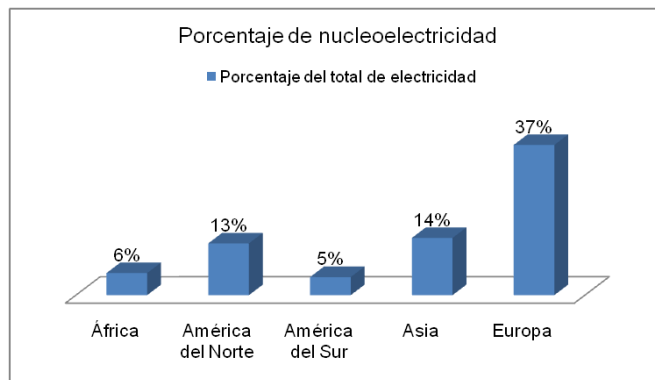
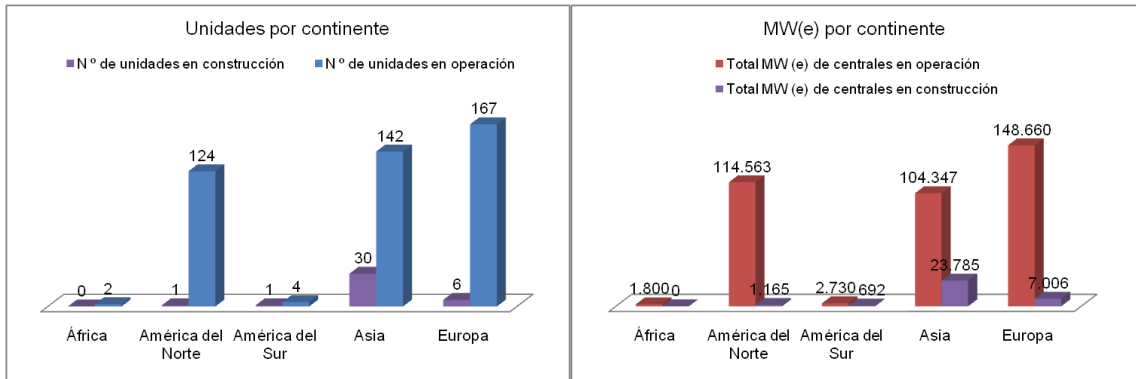
Elaborado en base a datos de IAEA PRIS: www.iaea.or.at/programmes/a2

Anexo 2: Plantas nucleares operativas y en construcción por continente

La tabla y los gráficos que se muestran a continuación fueron elaborados en base a datos de IAEA PRIS: www.iaea.or.at/programmes/a2

Tabla

Continente	En operación		En construcción		Porcentaje del total de electricidad
	N ° de unidades en operación	Total MW (e) de centrales en operación	N ° de unidades en construcción	Total MW (e) de centrales en construcción	
África	2	1.800	0	0	5,5%
América del Norte	124	114.563	1	1.165	12,9%
América del Sur	4	2.730	1	692	4,5%
Asia	142	104.347	30	23.785	14,3%
Europa	167	148.660	6	7.006	37,4%



Anexo 3: Principales Conclusiones del Informe Zanelli

Recogido del discurso de Zanelli en el Seminario Energía Nuclear AmCham, Expansiva y Libertad y Desarrollo.

1. Energía nuclear es una industria madura en el mundo. La cual entrega energía de una manera confiable y segura para las personas y el medio ambiente. Competitiva en costo y de bajas emisiones de CO₂.
2. No existe una razón a priori para descartar la energía nuclear en la matriz energética de Chile. Aspectos como características sísmicas del país o el manejo de los residuos son preocupaciones latentes pero no son problemas tan delicados ya que son tecnológicamente resuelto en el mundo y se pueden manejar.
3. La energía nuclear es un compromiso de largo plazo, por lo tanto debe ser adoptado por la sociedad entera. No es un asunto que deba ser decidido por un gobierno o por un ministerio o un consejo, si que debe ser asumido como un compromiso por toda la sociedad. El gobernó debe actuar como el ente regulador, ofreciendo garantías para los inversionistas a demás de poder ser un actor importante en el negocio mismo.
4. La energía nuclear en potencia demanda estándares de rigor superlativo y es difícil que en Chile exista alguna industria que tenga este rigor y exigencia. No hay errores permisibles, porque ese podría ser el último error.
5. El marco regulatorio y legal en Chile no es adecuado para implantar un planta nuclear de potencia, lo cual no significa que no se pueda modificar, las regulaciones ambientales son insuficientes al igual que las regulaciones económicas e insuficiente para enfrentarse a la demanda de este mercado. Además hay insuficiente capacidad para responder ante emergencias y riesgo radiológicos.
6. El escenario actual es complejo, pese a que se considere la energía nuclear no se debe estudiar en el futuro todas las formas de generación eléctrica como ERNC.
7. La energía nuclear genera desafíos que estimula el desarrollo científico y tecnológico de los países que la han tenido y genera interesantes casos de cooperación con nuestros vecinos que están más desarrollados en el tema que podrían tener efectos positivos y podrían cambiar el tomo de la discusión con ellos.

Anexo 4: Organizaciones de Chile involucradas en los estudios de localización de una planta de energía nuclear

Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (cendhoc):

El centro de datos oceanográficos miembro de la COI dependiente del SHOA, que adquiere, elabora, controla la calidad y realizan inventarios, archivan y difunden datos de acuerdo a las responsabilidades nacionales y asume la responsabilidad de intercambio mundial.

Web: http://www.shoa.cl/index_cendhoc.html

Comisión Chilena de Energía Nuclear (cchen):

Es una persona jurídica de derecho público y es un organismo de administración Autónoma de Estado con patrimonio Propio. Se relaciona con el Supremo Gobierno a través de Ministerio de Minería y es responsable del desarrollo de la ciencia y la tecnología nuclear del país. La CCHEN tiene como misión institucional realizar investigación, desarrollo y aplicaciones de la energía nuclear, así como su regulación, control y fiscalización, proporcionando servicios tecnológicos y de investigación y desarrollo a sectores externos, tales como Ministerios, Institutos del Estado, Empresas Públicas y Privadas, Universidades y Establecimientos Educativos, tal que impliquen una contribución efectiva al conocimiento en ciencia y tecnología, al bienestar y seguridad de las personas y protección del medio ambiente.

Web: <http://www.cchen.cl/>

Comisión Nacional del Medio Ambiente (conama):

Es la institución del Estado que tiene como misión velar por el derecho de la ciudadanía a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental. Depende de la Ministra de Medio Ambiente, quien fija las políticas institucionales, y una de sus tareas es coordinar la gestión ambiental del Estado.

Web: <http://www.conama.cl/portal/1301/channel.html>

Dirección General de Aeronáutica Civil:

Dependiente del ministerio de Defensa, maneja todo lo concerniente a la actividad aeronáutica de naturaleza civil, incluyendo el licenciamiento de aeropuertos, los planes de vuelo y el velar por el cumplimiento de la normativa que regula la actividad.

Web: <http://www.dgac.cl/>

Dirección General de Aguas (dga): Institución dependiente del Ministerio de Obras Públicas. Es el órgano rector del Estado en materia de agua terrestre una de sus función eses proporcionar y publicar la información correspondiente y tender coordinación de programas de investigación de entidades públicas y privadas.

Web: <http://www.dga.cl/>

Dirección General de Movilización Nacional: Este organismo tiene como misión el: “Desempeñarse como organismo asesor y de trabajo del Ministro de Defensa Nacional en todas las actividades relativas al Decreto Ley N° 2.306 de 1978 ”SOBRE NORMAS DE RECLUTAMIENTO Y MOVILIZACIÓN DE LAS FF.AA.”; Ley N° 18.953 ”DICTA NORMAS SOBRE MOVILIZACIÓN” de 1990; Ley N° 17.798, de 1972 sobre ”CONTROL DE ARMAS Y EXPLOSIVOS”; Ley N° 18.356 de 1984 sobre ”CONTROL DE ARTES MARCIALES” y sus respectivos Reglamentos Complementarios”⁴⁵

Web: <http://www.dgmn.cl/>

Dirección Meteorológica de Chile: Dependiente de la Dirección General de Aeronáutica Civil, es el organismo responsable del quehacer meteorológico en el país, y cuyo propósito es satisfacer las necesidades de información y previsión meteorológica de todas las actividades nacionales

Web: <http://www.meteochile.cl/>

Fuerza Aérea de Chile: Institución dependiente del Ministerio de Defensa de Chile, maneja un conjunto de sistemas aéreos y terrestres para proteger el espacio aéreo del país.

Web: <http://www.fach.cl/>

Instituto Nacional de Estadísticas (ine): Es el organismo técnico e independiente que produce, analiza y difunde las estadísticas oficiales y públicas de Chile. Proporciona información económica, social, demográfica, medioambiental y censal de manera transparente y accesible, con la finalidad que los agentes públicos, privados, investigadores y ciudadanos tomen decisiones informadas y así fortalecer una sociedad abierta y democrática.

Web: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/home.php

⁴⁵<http://www.dgmn.cl/dgmn/mision.php>

Oficina Nacional de Emergencia - Ministerio del Interior (ONEMI): Es la institución encargada de coordinar los sistemas de protección civil. Su misión incluye: “Planificar, articular, impulsar y ejecutar acciones de prevención, respuesta y recuperación frente a situaciones de riesgo colectivo, emergencias, desastres y catástrofes de origen natural o provocados por la acción humana.”⁴⁶

Web: <http://www.onemi.cl/>

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (shoa): Tiene como objetivo entrega asistencia técnica e información fluvial, lacustre y marítima para la seguridad de la navegación además de entregar servicio al Estado en materia hidrográfica, cartográfica náutica y oceanográfica.

Web: <http://www.shoa.cl/>

Servicio Meteorológico de la Armada de Chile: Dependiente de la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante Nacional. Esta encargado dar previsión del tiempo para las actividades marítimas y costeras y del desarrollo e investigación para determinar una más exacta previsión del tiempo.

Web: <http://www.directemar.cl/meteo/>

Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (snam): Representa oficialmente al Estado de Chile ante el Sistema Internacional de Alerta de Tsunamis del Pacífico, cuyo centro de operaciones es el Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) ubicado en Hawaii (Estados Unidos). El SNAM y PTWC interactúan permanentemente por medio de una serie de elementos tecnológicos que monitorean los factores indicativos de un posible tsunami.

Web: http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/snam_n.htm

Servicio Nacional de Geología y Minería (sernageomin): Es el asesor técnico especializado del Ministerio de Minería en materias geológicas y mineras. Una de sus funciones es promover y realizar investigación hidrológica sistemática del territorio nacional y la respectiva cartografía hidrogeológica.

Web: <http://www.sernageomin.cl/>

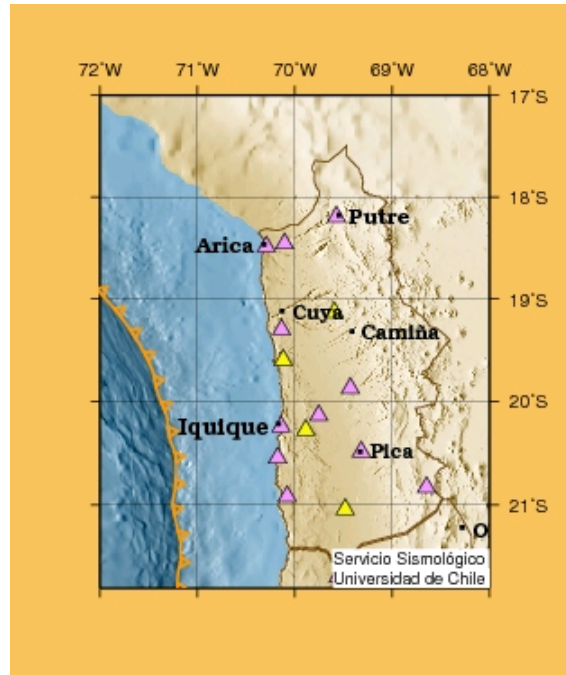
⁴⁶http://www.onemi.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=11&Itemid=10

Servicio Sismológico de Chile: Organismo dependiente del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Registra datos sobre sismología en el país, administra una red nacional de estaciones sismológicas y emite informes sobre los principales eventos ocurridos en el país.

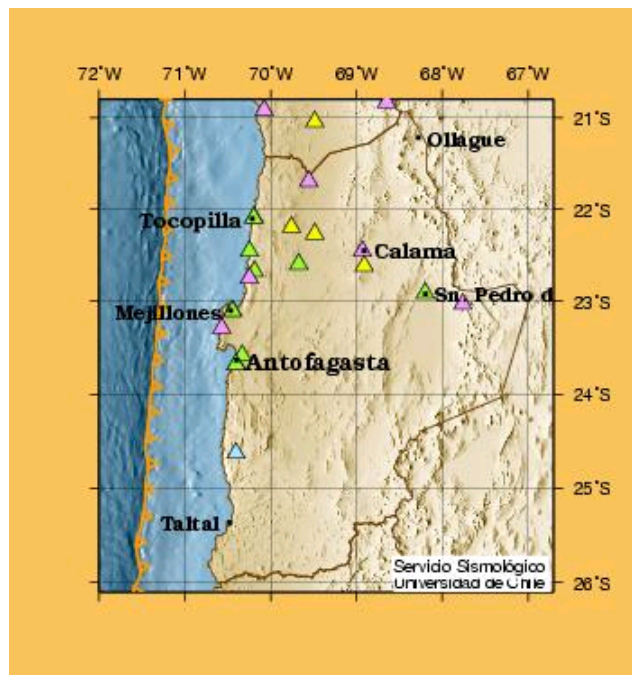
Web: <http://www.sismologia.cl/>

Anexo 5: Estaciones Sismológicas por Región⁴⁷

1. Regiones de Tarapacá y Arica y Parinacota

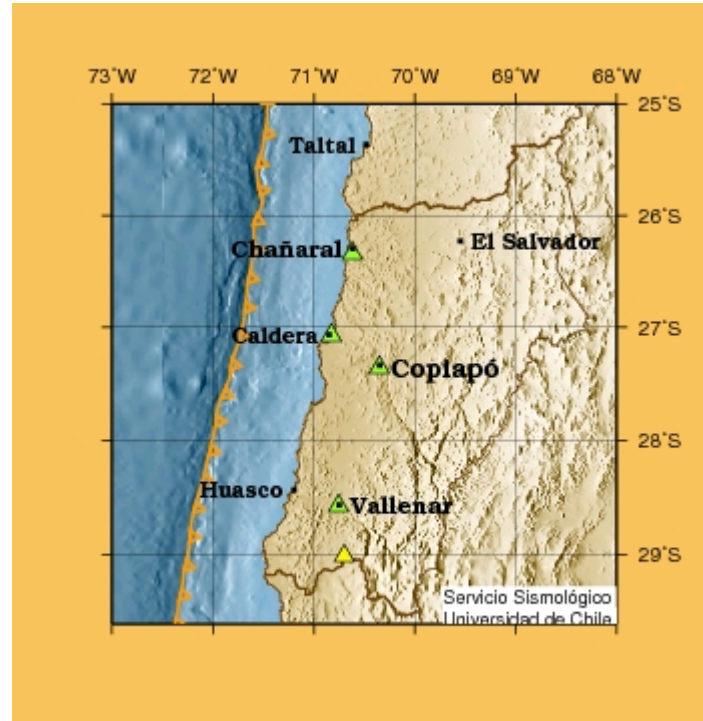


2. Región de Antofagasta

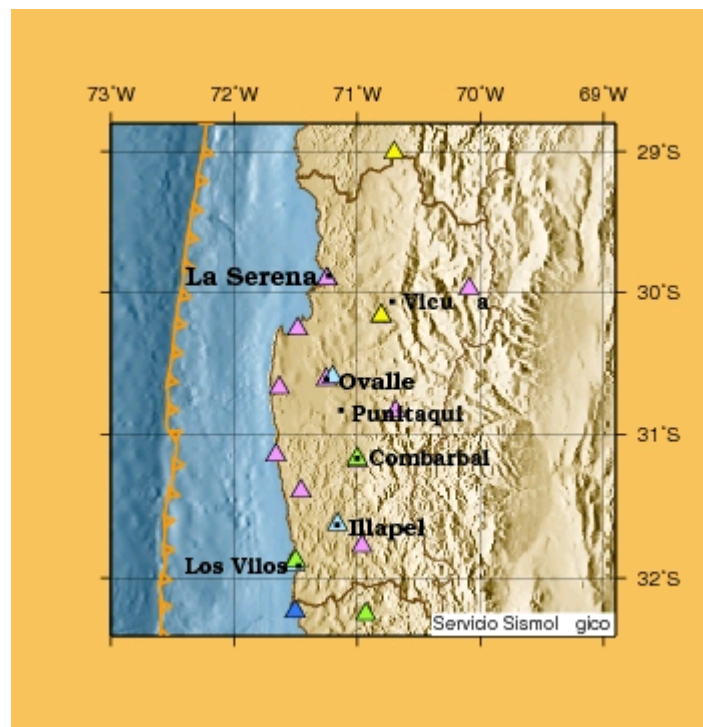


⁴⁷Servicio Sismológico de Chile

3. Región de Atacama



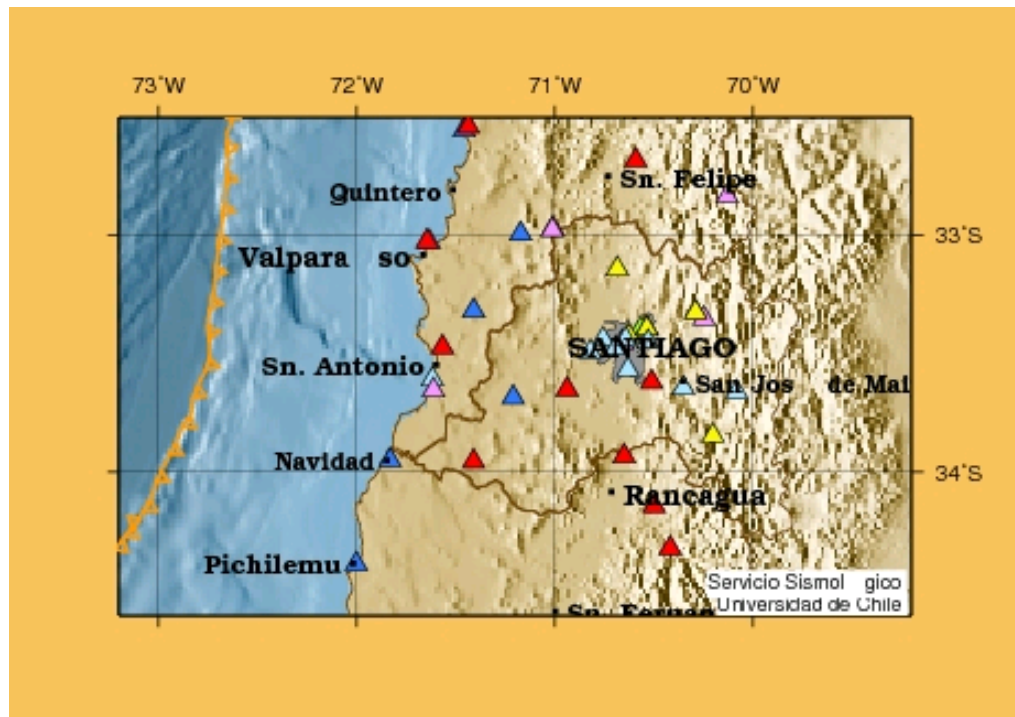
4. Región de Coquimbo



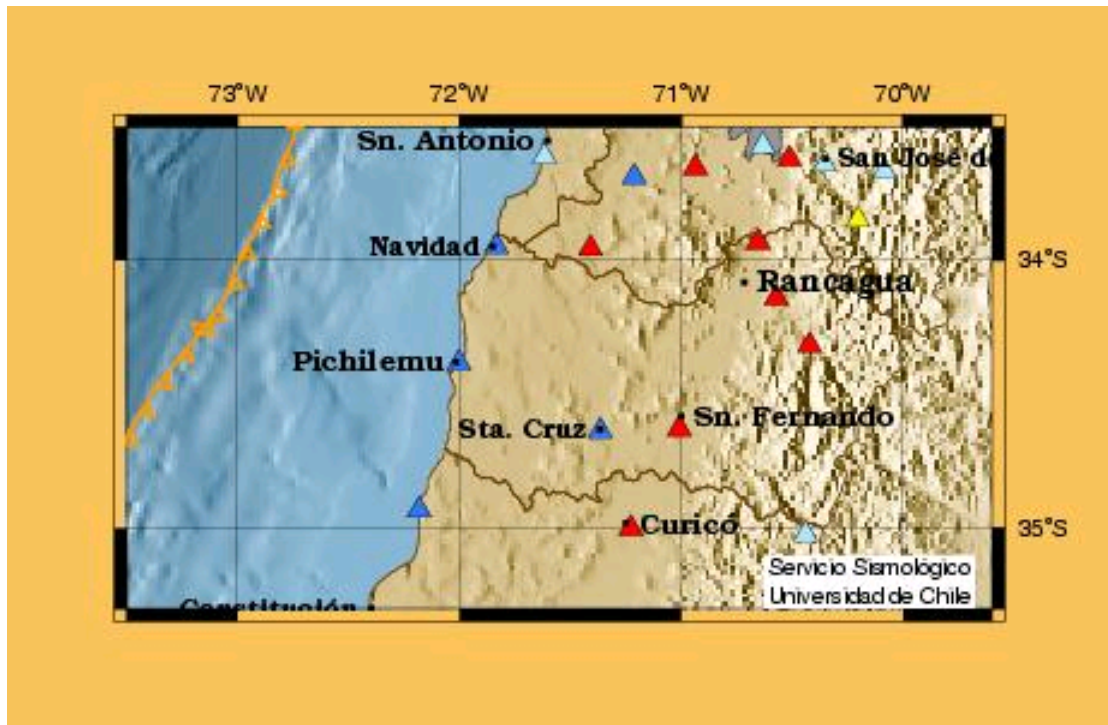
5. Región de Valparaíso



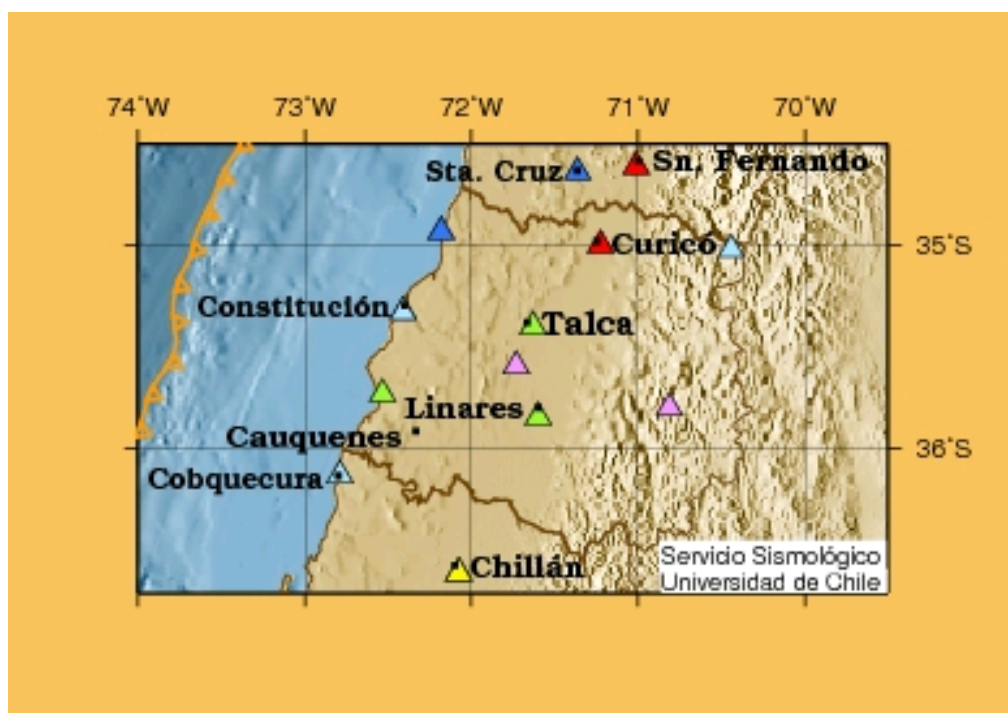
6. Región Metropolitana



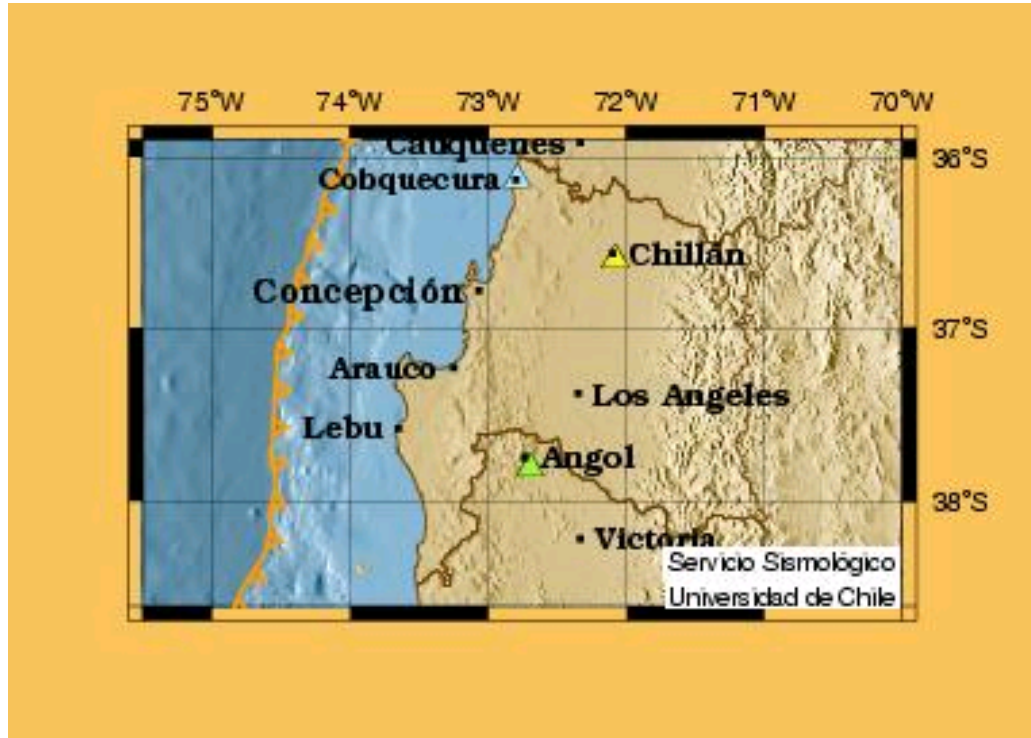
7. Región del Libertador General Bernardo O'Higgins



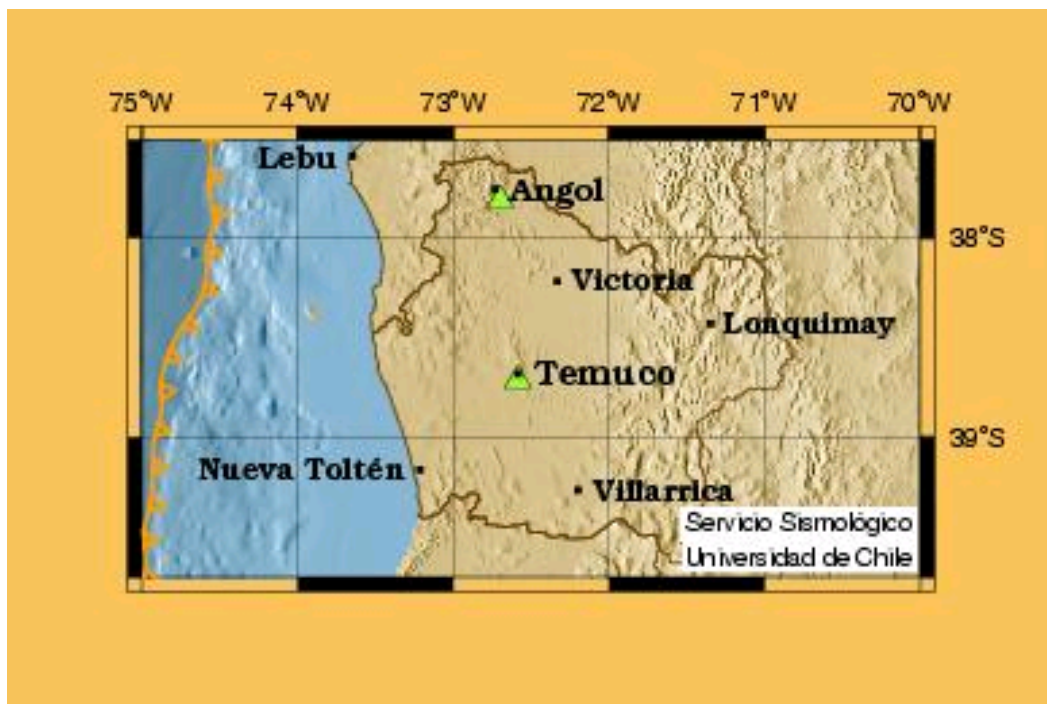
8. Región del Maule



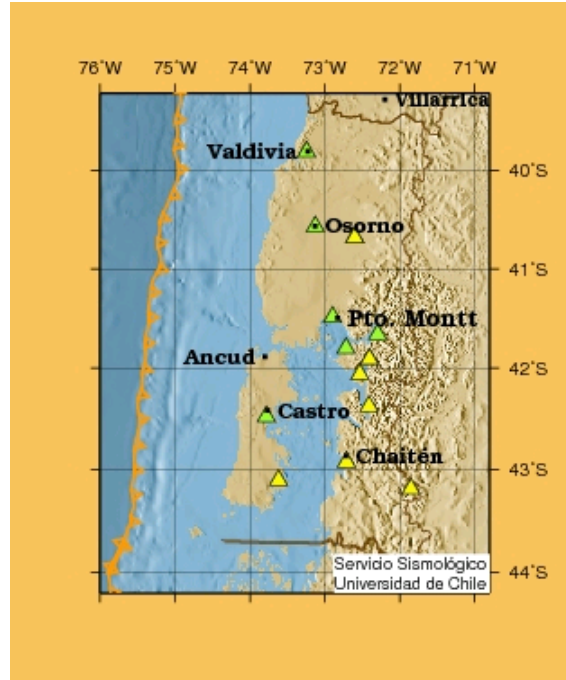
9. Región del Bio-Bio



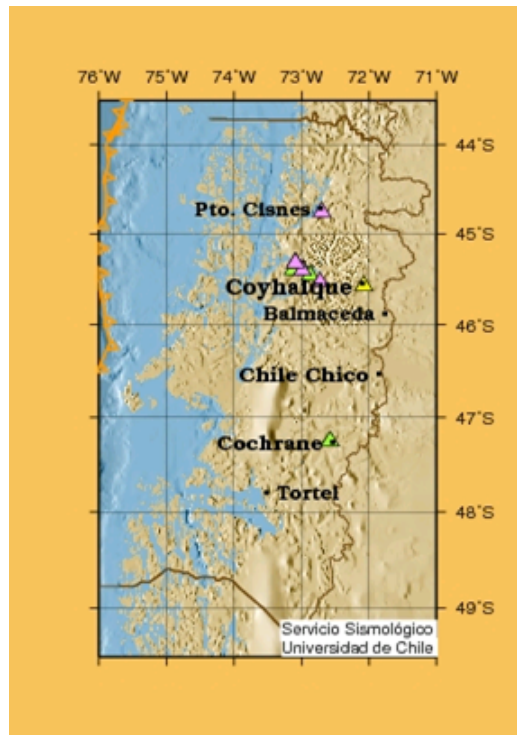
10. Región de la Araucanía



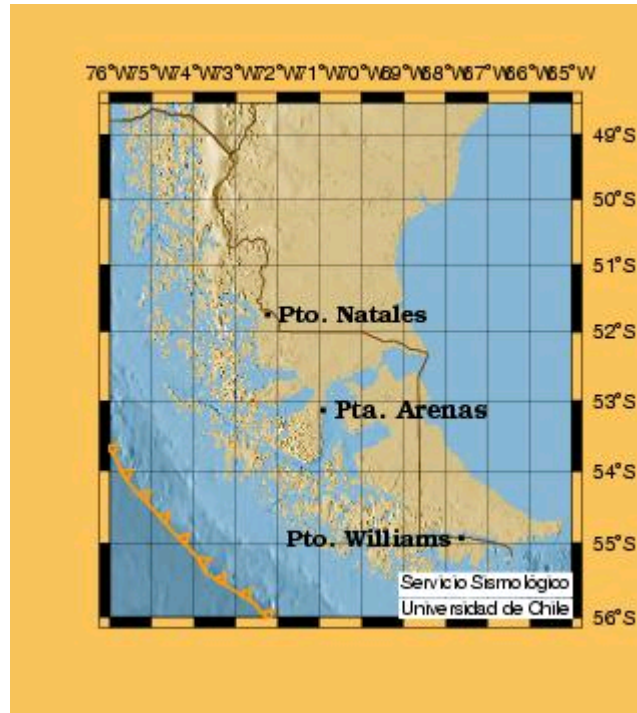
11. Regiones de los Lagos y los Ríos



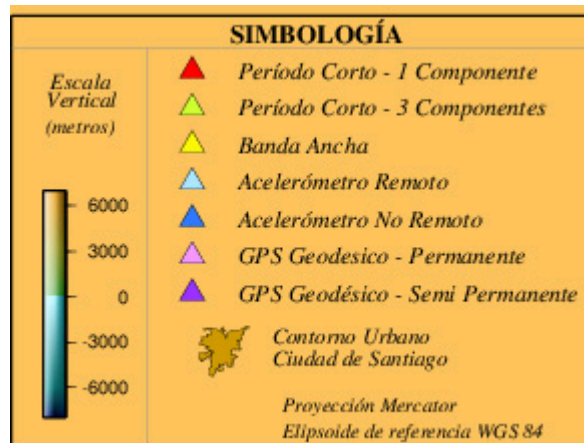
12. Región de Aysén



13. Región de Magallanes



14. Simbología



Anexo 6: Estaciones de la Dirección General de Aguas

Información extraída de Productos y servicios/Información Hidrológica/Formulario Solicitud Datos⁴⁸. Aquí, además de ver las imágenes presentadas a continuación, que muestran en colores la ubicación de las estaciones clasificadas por tipo, se puede ver el detalle listado de cada una de las estaciones.

Estaciones de Calidad de Aguas en color rosado



⁴⁸<http://www.dga.cl/sig.dga.cl/mupbiu/receiver.php?do=FramesetBNA>

Estaciones de Aguas subterráneas en color verde



Estaciones sedimentométricas en color rojo



Estaciones metereológicas en color amarillo



Estaciones Fluviométricas en color celeste



Estaciones Control de Lagos en color azul



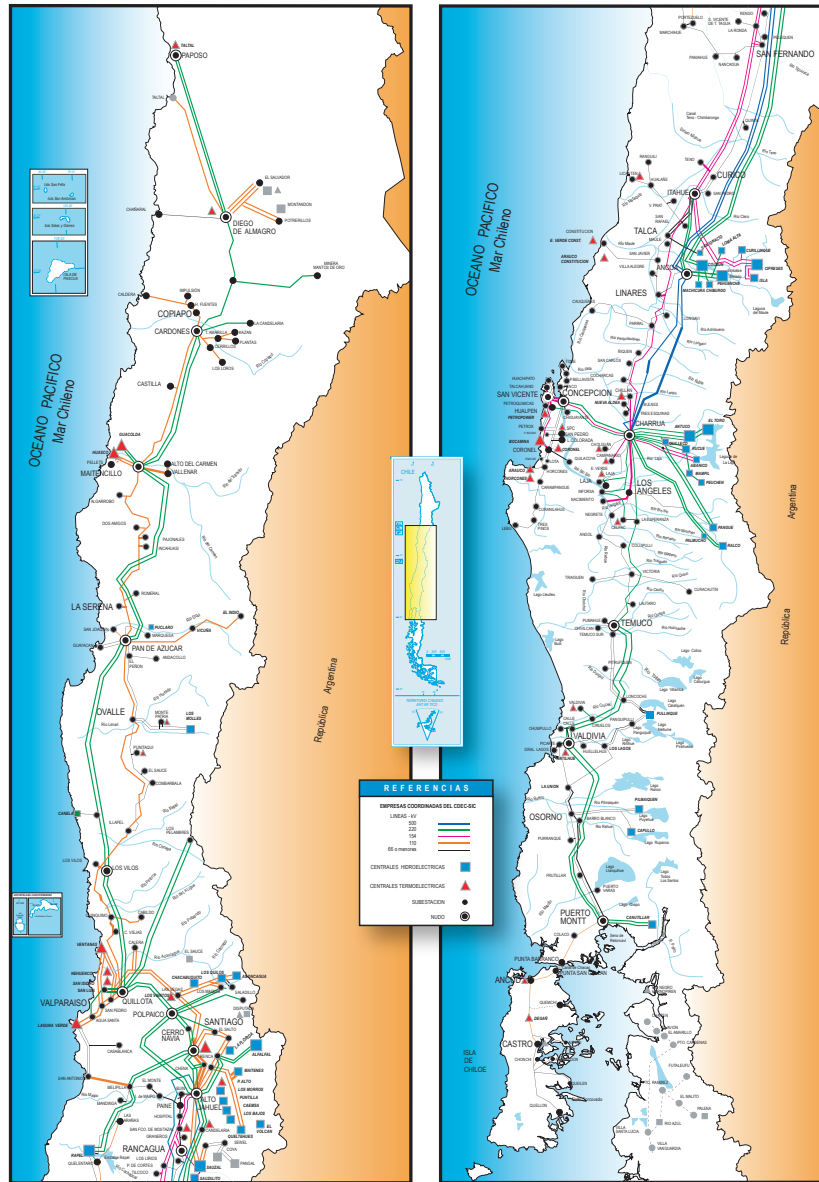
Anexo 7: Mapa Sistema Interconectado Norte Grande



Fuente: CDEC - SING, Estadísticas de Operación 1998 / 2007

Anexo 8: Mapa Sistema Interconectado Central

 **CDEC-SIC SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL**



*Autorizada su circulación por resolución N°175 del 9 de abril de 2003 de la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado. La edición y circulación de mapas cartográficos u otros impresos que se refieran o relacionen con los límites y fronteras de Chile no comprometen en modo alguno al Estado de Chile de acuerdo con el Art. 2° letra g) del DFL N° 18 de 1979 del Ministerio de Relaciones Exteriores.
Nota: Actualizado hasta abril de 2008.

Fuente: Sitio Oficial del Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central, Chile.