

**“ANÁLISIS Y ELABORACIÓN DE UNA PROPUESTA  
TÉCNICA DE ÍNDICES CUANTITATIVOS DE IMPACTO EN EL  
SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL ANTE AMENAZAS  
NATURALES Y EXACERBADAS PRODUCIDAS POR EL  
CAMBIO CLIMÁTICO”**

**INFORME FINAL  
ID: 584105-23-LE22**



**Jefe de proyecto: Marcelo Villena, Ph.D.**  
**[marcelo.villena@scl-econometrics.cl](mailto:marcelo.villena@scl-econometrics.cl) [www.marcelovillena.com](http://www.marcelovillena.com)**



**Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático**

Informe Final  
SCL Econometrics

Documento preparado para la Subsecretaría de Energía  
Licitación ID 584105-23-LE22

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

1.	Introducción .....	1
2.	Marco Teórico y Conceptual de Vulnerabilidad y Resiliencia Energética .....	5
2.1.	Breve revisión de la literatura .....	5
2.2.	Conceptos asociados a la vulnerabilidad y resiliencia energética ante amenazas naturales y exacerbadas producidas por el cambio climático .....	7
2.2.1.	Cambio Climático y Demanda Energética.....	8
2.2.2.	Amenazas Naturales e Infraestructura Energética .....	11
2.2.3.	Interacciones entre Vulnerabilidad y Resiliencia .....	12
2.2.4.	Factores Sociales y Económicos .....	14
2.2.5.	Diversificación de Fuentes de Energía .....	15
2.2.6.	Políticas de Adaptación .....	16
2.2.7.	Impactos del Cambio Climático y Adaptación en el Sector Energético Chileno .....	18
2.3.	Tipos de Amenazas Analizadas .....	19
2.3.1.	Amenazas naturales a considerar .....	19
2.3.1.1.	Terremotos .....	19
2.3.1.2.	Tsunamis .....	20
2.3.1.3.	Erupciones Volcánicas .....	21
2.3.2.	Amenazas exacerbadas por el cambio climático .....	22
2.3.2.1.	Olas de Calor.....	22
2.3.2.2.	Incendios como una amenaza a la infraestructura energética.....	24
2.3.2.3.	Marejadas: Amenazas Crecientes y Respuestas Adaptativas para la Infraestructura Energética .....	26
2.3.2.4.	Aluviones: Desafíos y Estrategias para la Infraestructura Energética .....	28
2.3.2.5.	Sequía.....	29
2.3.2.6.	Inundaciones: Desafíos y Respuestas para la Infraestructura Energética.....	30
2.3.3.	Principales conclusiones sobre las amenazas consideradas en el análisis.....	32
3.	Recopilación de información relevantes para el caso de Chile .....	36
3.1.	Principales instalaciones energéticas en Chile .....	36
3.2.	Principales eventos climáticos y fenómenos naturales registrados .....	45
3.2.1.	Marco conceptual.....	46
3.2.2.	Eventos climáticos .....	48
3.2.2.1.	Tsunami.....	48
3.2.2.2.	Amenaza volcánica .....	52
3.2.2.3.	Incendios forestales .....	55
3.2.2.4.	Grandes terremotos.....	57
3.2.2.5.	Eventos extremos .....	59
3.3.	Análisis de Causalidad SAIDI y SAIFI.....	62
4.	Casos de Estudio Internacionales: Revisión de Protocolos y Regulaciones Internacionales .....	72
4.1.	Exploración de regulaciones y protocolos internacionales que definen índices de vulnerabilidad y resiliencia en infraestructura energética. ....	72
4.1.1.	Revisión general.....	72

4.1.1.1.	Japón .....	72
4.1.1.2.	California .....	75
4.1.1.3.	Canadá.....	77
4.1.1.4.	Nueva Zelanda.....	78
4.1.1.5.	Australia .....	80
4.1.1.6.	Países Bajos .....	81
4.1.1.7.	Noruega.....	83
4.1.1.8.	Reino Unido .....	84
4.1.2.	Detalle de casos .....	86
4.1.2.1.	Japón .....	86
4.1.2.2.	California .....	87
4.1.2.3.	Australia .....	89
4.1.2.4.	Reino Unido .....	91
4.1.3.	Resumen de indicadores.....	92
5.	Simulación y proyección de índices de vulnerabilidad y resiliencia frente a amenazas exacerbadas por el cambio climático, para la infraestructura energética .....	93
5.1.	Data utilizada .....	94
5.2.	Indicadores calculados .....	94
5.3.	Programación del modelo de proyección .....	99
5.3.1.	Módulo PIB.....	99
5.3.2.	Módulo Generación Eléctrica.....	101
5.3.3.	Módulo de interrupciones del servicio .....	105
5.4.	Modelamiento estocástico y escenarios probables.....	107
6.	Políticas y normativa vigentes en Chile en materia de riesgos, vulnerabilidad y resiliencia en el sector energético .....	108
7.	Propuesta de medidas de adaptación para aumentar la resiliencia o reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático para la infraestructura crítica energética .....	111
7.1.	Generación eléctrica.....	111
7.1.1.	Generación Hidroeléctrica.....	111
7.1.1.1.	Tipo de evento .....	111
7.1.1.2.	Medidas propuestas.....	112
7.1.1.3.	Costo-Efectividad .....	114
7.1.1.4.	Impacto en vulnerabilidad y resiliencia. ....	114
7.1.1.5.	Pros y contras .....	115
7.1.2.	Generación Solar.....	116
7.1.2.1.	Tipo de evento .....	116
7.1.2.2.	Medidas propuestas.....	117
7.1.2.3.	Costo-Efectividad .....	119
7.1.2.4.	Impacto en vulnerabilidad y resiliencia .....	119
7.1.2.5.	Pros y contras .....	119
7.1.3.	Generación Eólica.....	120
7.1.3.1.	Tipo de Evento.....	121
7.1.3.2.	Medidas propuestas.....	121

7.1.3.3.	Costo-Efectividad .....	123
7.1.3.4.	Impacto en Vulnerabilidad y Resiliencia .....	124
7.1.3.5.	Pros y Contras.....	125
7.1.4.	Generación Convencional y Térmica.....	126
7.1.4.1.	Tipo de Evento.....	126
7.1.4.2.	Medidas Propuestas.....	128
7.1.4.3.	Costo-Efectividad .....	130
7.1.4.4.	Impacto en Vulnerabilidad y Resiliencia .....	130
7.1.4.5.	Pros y Contras.....	131
7.2.	Transmisión y distribución eléctrica .....	132
7.2.1.	Tipo de Evento .....	132
7.2.2.	Medidas Propuestas .....	133
7.2.3.	Costo-Efectividad.....	138
7.2.4.	Impacto en Vulnerabilidad y Resiliencia.....	138
7.2.5.	Pros y Contras .....	139
8.	Metodología para el monitoreo, reporte, verificación y evaluación (MRV+E) .....	141
	Referencias consultadas.....	143
	Anexo 1. Salidas de las simulaciones de Montecarlo al año 2060 .....	144

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.	Esquema metodológico para la presente consultoría. ....	3
Figura 2.	Principales instalaciones del sistema eléctrico en Chile .....	39
Figura 3.	Principales instalaciones del sistema de hidrocarburos en Chile .....	40
Figura 4.	Simbología empleada para representar las instalaciones del sistema eléctrico en Chile .....	41
Figura 5.	Climas presentes en Chile según clasificación Köppen .....	44
Figura 6.	Simbología empleada para la clasificación climática Köppen .....	45
Figura 7.	Modelo de interacción del riesgo del IPCC (2014) .....	48
Figura 8.	Altura máxima de inundación esperada por un tsunami .....	49
Figura 9.	Área de influencia de las inundaciones esperadas por eventos de tsunami – Instalaciones de capacidad.....	51
Figura 10.	Área de influencia de las inundaciones esperadas por eventos de tsunami – Instalaciones tipo ducto.....	52
Figura 11.	Riesgo identificado ante eventos de amenaza volcánica.....	53
Figura 12.	Área de influencia de las amenazas volcánicas – Instalaciones de capacidad .....	54
Figura 13.	Área de influencia de las amenazas volcánicas – Instalaciones tipo ducto.....	55
Figura 14.	Mapa de riesgo de incendios forestales .....	56
Figura 15.	Mapa de ocurrencia de grandes terremotos .....	58
Figura 16.	Consumo de energía primaria en Japón. Sobre el petróleo, la franja de color naranja representa los biocombustibles y basura, el amarillo las ERNC y el verde oscuro la generación hidráulica .....	73

Figura 17. Consumo de energía primaria en el Reino Unido. La franja amarilla representa las ERNC...	85
Figura 18. Estructura del modelo .....	93
Figura 19. Módulo de PIB de la planilla de proyección .....	100
Figura 20. Módulo de ingreso de parámetros para generación .....	102
Figura 21. Tablas de proyección del módulo de generación .....	103
Figura 22. Ingreso de parámetros en el Módulo de interrupciones. ....	105
Figura 23. Proyecciones de los indicadores SAIDI y SAIFI.....	106

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico 1. Evolución de las temperaturas máximas promedio mensual, por zona geográfica.....	9
Gráfico 2. Variación de caudales de ríos.....	10
Gráfico 3. Eventos extremos ocurridos en Chile 2020 – 2021 .....	60
Gráfico 4. Regiones afectadas por los eventos climáticos extremos más frecuentes.....	62
Gráfico 5. Evolución del SAIDI regional en Chile (2012-2021) .....	64
Gráfico 6. Consumo de energía primaria en California .....	76
Gráfico 7. Consumo de energía primaria en Canadá.....	77
Gráfico 8. Consumo de energía primaria en Nueva Zelanda .....	79
Gráfico 9. Consumo de energía primaria en Australia. Sobre el petróleo, la franja de color amarillo representa los biocombustibles y basura, el verde oscuro las ERNC y el verde claro la generación hidráulica. ....	80
Gráfico 10. Consumo de energía primaria en Países Bajos. Sobre el petróleo, la franja de color naranja representa los biocombustibles y residuos, el amarillo las ERNC y el verde claro la generación nuclear .....	82
Gráfico 11. Consumo de energía primaria en Noruega .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Tabla resumen sobre amenazas naturales y sus implicancias .....	34
Tabla 2. Tabla resumen de amenazas exacerbadas por el cambio climático y sus implicancias .....	35
Tabla 3. Resumen de instalaciones de energía existentes en Chile, según Macrozona .....	37
Tabla 4. Clasificación Köppen para los climas en Chile.....	42
Tabla 5. Eventos extremos ocurridos en Chile 2020 – 2021 .....	59
Tabla 6. Regiones afectadas por los eventos climáticos extremos más frecuentes .....	61
Tabla 7. Análisis de causalidad del SAIDI país .....	67
Tabla 8. Análisis de causalidad del SAIDI región .....	68
Tabla 9. Análisis de causalidad del SAIFI país.....	69
Tabla 10. Análisis de causalidad del SAIFI región .....	70
Tabla 11. Acciones relevantes a los resultados presentados.....	90
Tabla 12. Listado de métricas relevantes a las acciones presentadas. ....	91

Tabla 13. Indicadores a evaluar de vulnerabilidad y resiliencia frente a amenazas exacerbadas por el cambio climático, para la infraestructura energética eléctrica. ....	95
Tabla 14. Principales reglamentos sector eléctrico que requieren adecuación por resiliencia climática. Fuente: Adaptada de Centro de Energía de la Universidad de Chile (2023) .....	109
Tabla 15. Principales normas eléctricas que requieren adecuación por resiliencia climática. Fuente: Adaptada de Centro de Energía de la Universidad de Chile (2023).....	110



---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Si bien el foco de atención en el vínculo entre cambio climático y energía, tanto a nivel global como local, ha estado puesto en la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), la adaptación y la resiliencia frente a las amenazas climáticas está cobrando cada vez mayor relevancia puesto que son factores que incidirán en la planificación y operación del sistema energético y, por tanto, también en cómo logra cumplir el sector sus presupuestos de carbono de cara a la meta de carbono neutralidad de Chile al 2050.

A nivel global, el nexos entre vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector energético se establece en el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5), el cual entre sus principales conclusiones destaca que el cambio climático afectará a las fuentes energéticas y tecnologías de generación de forma diferenciada dependiendo del recurso energético y las especificidades del territorio. Además, señala que la resiliencia de los sistemas de transporte de energía podría verse afectada y que, debido al aumento de temperatura global, se prevé una reducción de la demanda energética del sector residencial y comercial por calefacción, aumentando la demanda por climatización, entre otros aspectos.

La Política Energética Nacional (PEN), actualizada en 2022, mediante el Decreto Supremo N° 10, de 2022, del Ministerio de Energía, está basada en tres grandes propósitos: (i) sector energía como protagonista de la ambición climática del país; (ii) energía como la base de una mejor calidad de vida y (iii) nueva identidad productiva para Chile. A su vez, estos propósitos se sustentan en dos pilares: (i) **sistema energético resiliente** y (ii) eficiencia para cambiar la forma de hacer políticas públicas. Esto plasma el compromiso del Ministerio de Energía con una transición energética segura y responsable, hacia una matriz renovable, lo que es especialmente importante considerando la posición de vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático, en la que se encuentra nuestro país.

Para esto, el Plan de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Energía 2018-2023, sentó las bases de análisis y resaltó las principales amenazas y algunos de los impactos que podrían afectar a los distintos segmentos de energía - a saber, generación, transporte y demanda energética-, basado en la experiencia tanto nacional como internacional. Así es como se definieron quince medidas enfocadas principalmente a cubrir brechas de información y a generar las capacidades para definir acciones de adaptación frente al cambio climático en el sector.

Por otra parte, la Ley N° 21.455, Ley Marco de Cambio Climático, establece el régimen jurídico para abordar los desafíos de la crisis climática en el país. Entre los diferentes instrumentos de gestión que establece dicha ley se encuentran los Planes Sectoriales de Adaptación (PSA), que deben contener un conjunto de acciones y medidas para lograr adaptar al cambio climático aquellos sectores con mayor





vulnerabilidad y aumentar su resiliencia climática. Así, el Ministerio de Energía tiene a su cargo elaborar, en un plazo de dos años, el PSA del sector energía, según se establece en el artículo 9, letra f) de la citada ley.

Para avanzar en la elaboración del PSA de Energía, se requiere continuar generando información relevante de los impactos del cambio climático y otras amenazas naturales en los segmentos de demanda energética y transporte de energía, e integrar la información existente, para incorporarla en los procesos de planificación y toma de decisiones del Ministerio y otras instituciones del sector. Un ejemplo de ello es la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP), proceso desarrollado por el Ministerio de Energía cada cinco años y para un periodo de al menos 30 años, conforme a lo dispuesto en el artículo 83° del Decreto con Fuerza de Ley N° 4/20.018, de 2006, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, que fija texto refundido, coordinado y sistematizado del Decreto con Fuerza de Ley N° 1, de Minería, de 1982, Ley general de Servicios Eléctricos, en materia de energía eléctrica, en adelante, la “LGSE”, el cual debe incluir escenarios de proyección de oferta y demanda energética, y que debe ser considerada en la Planificación de la Transmisión. Además, los resultados de la PELP han sido insumos fundamentales para la definición de políticas de cambio climático a nivel país, como la definición de la actualización de la Contribución Determinada Nacionalmente (NDC).

Adicionalmente, el Ministerio de Energía posee el compromiso de avanzar en la planificación e inversión en la reducción de riesgos de desastres para la resiliencia, correspondiente al eje prioritario 3 del Plan Estratégico 2020-2030 de la Política para la Reducción del Riesgo de Desastres del Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (Senapred) y, específicamente, de proponer estrategias de adaptación al impacto del cambio climático vinculadas a la reducción de riesgos de desastres (RRD), incorporando este enfoque en estrategias sostenibles del recurso energético.

El año 2020, el Ministerio de Energía, junto con GIZ, desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue definir y aplicar una metodología de análisis para examinar la disponibilidad de los recursos hídricos, eólicos y solares para la generación eléctrica hasta el año 2060 bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5., esto con el objetivo de integrar estos resultados a los procesos de planificación estratégica del Ministerio, como lo es la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP). El estudio mostró que, a futuro, debido a la disminución de precipitaciones, los caudales se reducirán en un 20%, impactando el factor de planta de las centrales en un 10%, aproximadamente, para el año 2060. En relación con las energías solar y eólica, se observó que el escenario se mantiene favorable o con pocos cambios significativos. En la misma línea de la colaboración con GIZ, la Subsecretaría de Energía, a través de su División de Políticas y Estudios Energéticos y Ambientales, requiere contratar un estudio que permita analizar los impactos del cambio climático en las proyecciones de demanda energética y, asimismo, elaborar una propuesta técnica de índices cuantitativos de impacto ante amenazas naturales y exacerbadas



producidas por este cambio, dado que no se cuenta con los recursos humanos suficientes para ejecutar el servicio objeto de la presente contratación.

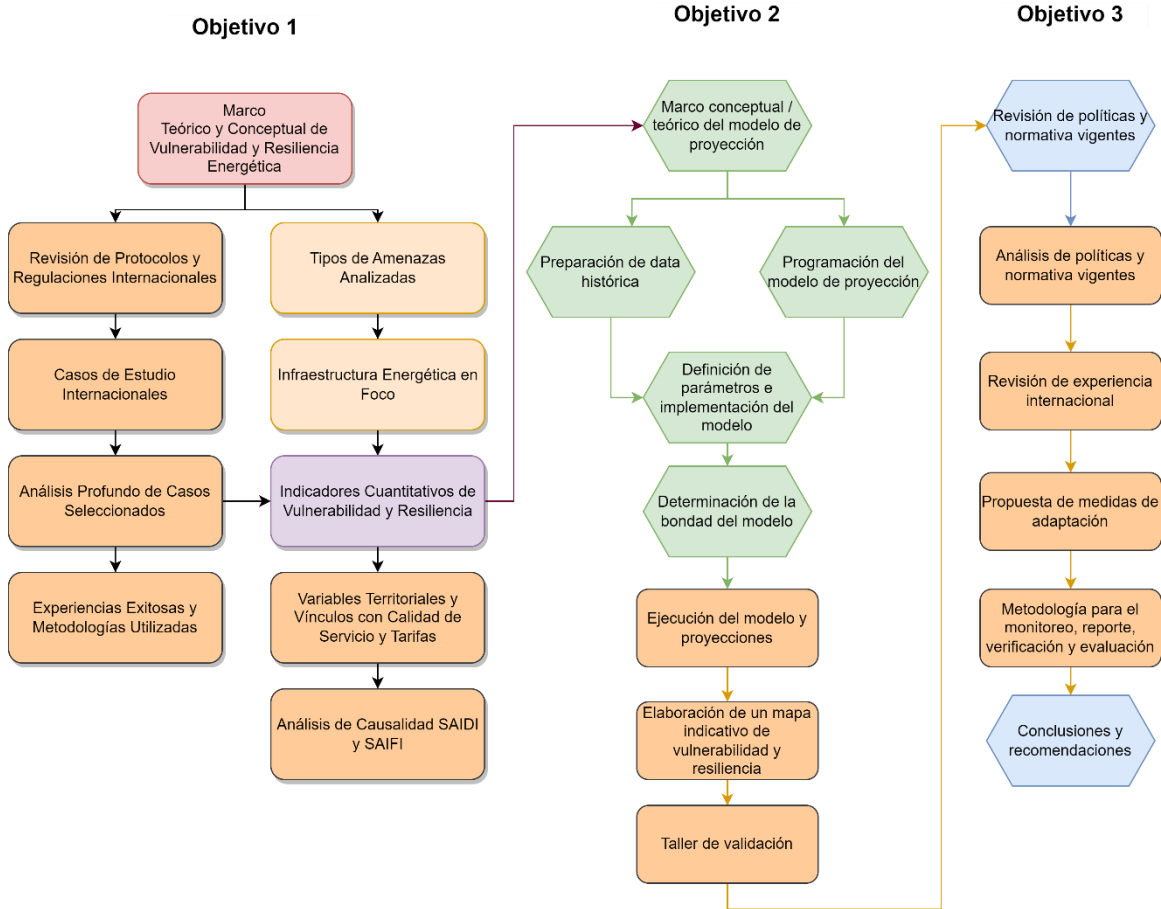
Así, el objetivo general del presente estudio es Apoyar a la Subsecretaría de Energía, en adelante la “Subsecretaría”, en la elaboración de índices cuantitativos de impacto en el sistema energético nacional ante amenazas naturales y exacerbadas producidas por dicho cambio, a través de la identificación, disponibilidad, recolección, análisis, sistematización y procesamiento de información, para definir una estrategia de resiliencia y adaptación para la infraestructura energética.

De este objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos.

- a. Realizar la revisión y análisis de índices cuantitativos de vulnerabilidad y resiliencia aplicados a infraestructura energética, frente al aumento de la demanda energética por cambio climático y amenazas naturales y exacerbadas por cambio climático, utilizados a nivel internacional y nacional. Se considerará como referencia para el desarrollo de este objetivo los casos de países como Japón, Estados Unidos, Australia y Reino Unido, así como protocolos de organismos internacionales y/o multilaterales, además del estudio “Desarrollo de indicadores para el monitoreo y evaluación del progreso de la adaptación al cambio climático a nivel nacional” desarrollado por el Ministerio de Medio Ambiente. Este último será proporcionado por la Subsecretaría.
- b. Proponer, simular y proyectar al año 2060, índices de vulnerabilidad y resiliencia frente a amenazas exacerbadas por el cambio climático, para la infraestructura energética (eléctrica y combustibles). Para esta proyección, previamente los parámetros deberán ser acordados con la contraparte técnica de la Subsecretaría y deberán quedar claramente definidos y especificados para futuros usos que podrá darle la Subsecretaría, mientras que el proveedor deberá entregarle todas las bases de datos utilizadas y requeridas para esta actividad.
- c. Generar una propuesta de medidas de adaptación costo-efectivas que sirva de base para elaborar una estrategia de resiliencia y adaptación para infraestructura energética, junto a los índices necesarios para su monitoreo, reporte, verificación y evaluación (MRV+E).

Sobre la base de los objetivos y productos esperados del estudio, es posible esquematizar la metodología propuesta de acuerdo a la figura siguiente.

Figura 1. Esquema metodológico para la presente consultoría.



Fuente: Elaboración propia

Los tres objetivos de la consultoría están claramente delimitados, los que a su vez generan, a grandes rasgos, tres productos: la propuesta de indicadores, el modelo de proyección, y la propuesta de medidas y su monitoreo.



---

## 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL DE VULNERABILIDAD Y RESILIENCIA ENERGÉTICA

---

Las políticas energéticas dedicadas a la sostenibilidad están en la agenda de los gobiernos locales y de las principales instituciones internacionales. Las estrategias energéticas están llamadas a enfrentar nuevas preocupaciones, como son, la pobreza energética, la seguridad, y los problemas de resiliencia y vulnerabilidad energética.

### 2.1. Breve revisión de la literatura

La literatura económica no caracteriza de manera única y tal vez no ofrece una noción clara de los conceptos de vulnerabilidad energética, resiliencia, pobreza, justicia, sostenibilidad y seguridad (Cherp & Jewell, 2010). Sin embargo, se reconoce que la vulnerabilidad, la resiliencia y la sostenibilidad están estrechamente entrelazadas (Stirling, 2014). Se necesita una comprensión clara de cómo estos conceptos se relacionan con la política energética, especialmente porque la elección del marco teórico y metodológico afecta la interpretación de los resultados (Sovacool, 2011; Kruyt et al, 2009; Winzer, 2012). Vale la pena aplicar esta afirmación a la vulnerabilidad energética, subrayando la necesidad de definir y medir un tema que aún no está suficientemente delimitado en la literatura.

La energía es uno de los principales motores del crecimiento económico, el empleo y el desarrollo sostenible. La política energética es una importante área de acción de la agenda de desarrollo. Garantizar servicios energéticos para todos se reconoce como una estrategia central para abordar la pobreza y alcanzar la seguridad energética en sí misma. La implementación de un acceso a la energía moderno, asequible, confiable, sostenible y universal debe ser uno de los requisitos previos para permitir ciclos económicos virtuosos. Tal acceso eventualmente aliviaría la pobreza, contribuiría a proteger el medio ambiente y construir instituciones sólidas (ONU, 2015).

En septiembre de 2015, la ONU lanzó la Agenda 2030. Dentro de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), las políticas de vulnerabilidad y resiliencia tienen un papel protagónico. Por otro lado, la política energética se abordó a través de un objetivo completo: el ODS 7 requiere “garantizar el acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos” (ONU, 2015). Como parte del ODS 7, se detectaron 5 metas y 6 indicadores con alcances específicos de política energética, a ser alcanzados al 2030. La Meta 7.1 propone “garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, confiables y modernos”, mientras que la Meta 7.2 establece “aumentar sustancialmente la participación de las energías renovables en la combinación energética mundial”. Para la Meta 7.3, se acordó “duplicar la tasa global de mejora en la eficiencia energética”, y para la Meta 7.A, el consenso se basó en “mejorar



la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y tecnología de energía limpia, incluida la energía renovable, eficiencia energética y tecnología avanzada y más limpia de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías de energía limpia". La última meta relevante, 7.B, se centró en "expandir la infraestructura y mejorar la tecnología para suministrar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, de conformidad con sus respectivos programas de apoyo".

La regulación energética también afecta la vulnerabilidad energética, ya que la historia observa que los esquemas de manipulación de precios de la energía se cruzaron con el esquema de regulación. Con el alcance de fusionar los mercados nacionales en un mercado energético europeo único, la Comisión Europea (CE) saludó un conjunto de reformas, con el objetivo de mejorar la seguridad del suministro, la sostenibilidad ambiental, la eficiencia de producción y la competitividad del mercado (Gnansounou, 2008). En términos regulatorios, en los últimos años la UE mostró ser proactiva en materia de regulación de seguridad energética, implementando una serie de directrices y Libros Verdes (*Green Books*)<sup>1</sup> a través de la CE (EC 2001a, 2001b, 2003 & 2006). La crisis energética de EE. UU. de 2000-2001 condujo a una regulación adicional de la UE: la Regulación sobre integridad y transparencia del mercado mayorista de energía; esto tenía como objetivo defender los mercados energéticos del riesgo de abuso de información privilegiada, manipulación del mercado y transacciones mayoristas en los mercados energéticos (UE, 2011).

Entre las acciones más recientes de la UE, hay que mencionar el paquete de transición a la economía circular, adoptado el 2 de diciembre de 2015 por la CE y aprobado en marzo de 2019. Este modelo industrial prevé un nuevo papel para los productos y materiales, pasando de una vida lineal a una circular. La economía circular concibe un papel fundamental para los giros energéticos: se minimizan y valorizan los residuos y los recursos, en aras de estimular la innovación, el crecimiento y la ocupación en una visión de desarrollo sostenible (Ferrari, Gatto & Zada, 2017; Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016).

Para completar el cuadro, hay una corriente adicional de investigación centrada en indicadores de política energética; estos estudios exploraron la vulnerabilidad y la resiliencia de base, la pobreza

---

<sup>1</sup> Los *green books* de la CE son documentos de consulta que publica la Comisión Europea para iniciar un debate público sobre una cuestión específica. Se trata de documentos de trabajo que no tienen carácter vinculante, pero que sirven para recoger las opiniones de los ciudadanos, las empresas y las organizaciones de la sociedad civil. Los *green books* se suelen publicar antes de la elaboración de una propuesta legislativa, con el objetivo de recoger información y opiniones que permitan a la Comisión tomar una decisión informada. También pueden utilizarse para explorar nuevas opciones políticas o para iniciar un debate sobre un tema que aún no está maduro para la legislación.



energética, la sostenibilidad, la justicia y la seguridad; La vulnerabilidad energética también recibió algunas atenciones en estos estudios, especialmente en lo que respecta a la oferta. Normalmente, los análisis proponen un indicador simple y/o compuesto para medir los fenómenos. Aunque tanto la definición como el cálculo de la vulnerabilidad energética siguen sin estar completamente cubiertos y son ambiguos. Los índices más recientes generalmente transmiten en atribuir un papel crucial a la sostenibilidad. Entre muchos, Patlitzianas (2008) y Badea (2010) ofrecen una revisión exhaustiva de varios indicadores, métodos y objetivos, centrados en la política energética sostenible.

## 2.2. Conceptos asociados a la vulnerabilidad y resiliencia energética ante amenazas naturales y exacerbadas producidas por el cambio climático

La vulnerabilidad energética se refiere a la susceptibilidad de la infraestructura energética a sufrir daños o interrupciones significativas debido a amenazas naturales o cambios en el entorno. Implica la capacidad limitada para resistir, absorber y recuperarse de impactos adversos sin comprometer el suministro de energía. En el contexto de este estudio, se explorarán diferentes dimensiones de vulnerabilidad, incluyendo la económica, social y ambiental.

La resiliencia energética, por otro lado, se refiere a la capacidad de la infraestructura energética para absorber choques y perturbaciones, adaptarse a condiciones cambiantes y recuperarse rápidamente de eventos adversos. Implica la planificación y el diseño de sistemas energéticos que puedan resistir y recuperarse de manera efectiva, minimizando las interrupciones en el suministro y los impactos negativos en la sociedad y la economía. Da cuenta de un proceso dinámico asociado a la capacidad de un sistema y de sus componentes, tales como población, infraestructura, servicios, medios de vida o medio ambiente, entre otros, para anticipar, resistir, absorber, adaptar y recuperarse de los efectos de un evento, de manera integral, oportuna y eficaz, incluso garantizando la preservación, restauración o mejora de sus estructuras y funciones básicas. Permite dimensionar la habilidad de un sistema con la cual una comunidad se recupera inmediatamente posterior a la ocurrencia de un evento, y cómo supera el estado existente previo al desastre. Cuentan para la evaluación de la resiliencia aspectos como la redundancia, rapidez, robustez y habilidad (Decreto 434 del 2020 del Ministerio de Interior, Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030).

La ley 21455, Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) fue promulgada en mayo de 2022 y en ella se definen los conceptos de adaptación y resiliencia en su artículo 3º, como sigue:

- Adaptación al cambio climático: acción, medida o proceso de ajuste al clima actual o proyectado o a sus efectos en sistemas humanos o naturales, con el fin de moderar o evitar los



daños, reducir la vulnerabilidad, aumentar la resiliencia o aprovechar las oportunidades beneficiosas.

- Resiliencia climática: capacidad de un sistema o sus componentes para anticipar, absorber, adaptarse o recuperarse de los efectos adversos del cambio climático, manteniendo su función esencial, conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.

### 2.2.1. Cambio Climático y Demanda Energética

El cambio climático representa uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI. A medida que el planeta experimenta incrementos en las temperaturas medias, la variabilidad climática y la intensidad y frecuencia de eventos extremos, se perciben cambios en la demanda y suministro energético a nivel global y local. Especialmente en naciones como Chile, con una economía emergente y un ecosistema diverso, la relación entre cambio climático y demanda energética resulta de suma relevancia.

Uno de los impactos más evidentes del cambio climático es el aumento de las temperaturas a nivel global. En el contexto de Chile, un país con una inmensa diversidad geográfica y climática, un aumento en las temperaturas puede traducirse en diferentes demandas energéticas, la cual podrá variar para distintas regiones. Por ejemplo, se puede esperar un incremento en la demanda de energía para refrigeración, especialmente durante los meses de verano, dada la intensificación de las olas de calor. Lo anterior no solo afecta a las regiones de más al norte o del centro del país, sino también a las regiones de más al sur. Todo esto, a su vez, lleva a una mayor presión sobre la red eléctrica, y una necesidad de contar con sistemas de generación más robustos y flexibles.



Gráfico 1. Evolución de las temperaturas máximas promedio mensual, por zona geográfica.



Fuente: Elaboración propia en base a información de la Dirección Meteorológica Nacional.

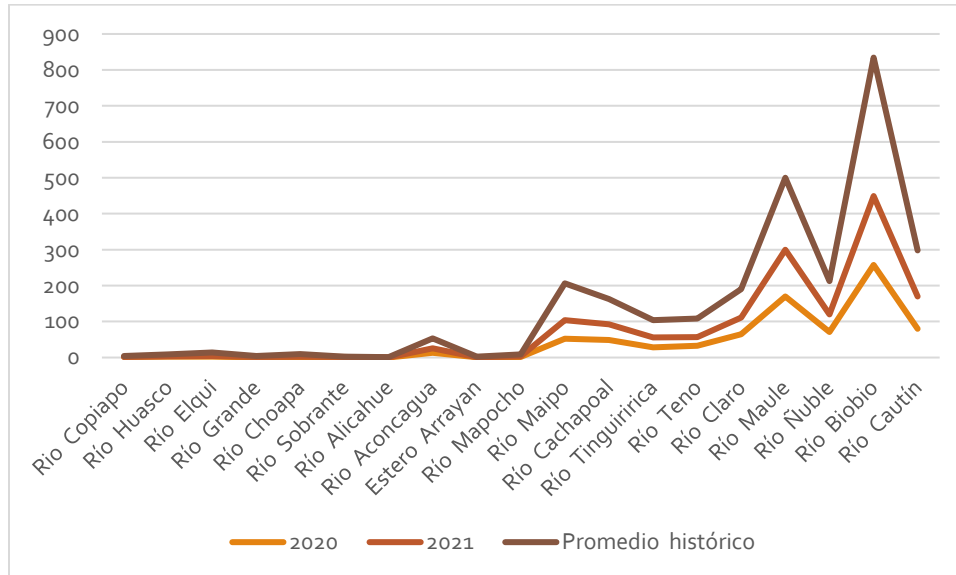
En términos generales, las temperaturas máximas han tendido al alza durante los últimos 60 años. En promedio en la zona central han aumentado  $1,1^{\circ}\text{C}$ , en la zona sur  $0,8^{\circ}\text{C}$ , y en la zona austral  $1^{\circ}\text{C}$ . Solo en la zona norte registra una leve disminución ( $-0,3^{\circ}\text{C}$ ).

Por otro lado, la variabilidad climática también juega un papel crucial. En la mayoría de las regiones del norte y centro de Chile, la sequía persistente ha disminuido la disponibilidad de agua para la producción hidroeléctrica, una fuente energética significativa para el país. La disminución del recurso hídrico, que ya es una realidad palpable en zonas como las regiones de Coquimbo y Valparaíso, impacta no solo la generación hidroeléctrica, sino también a la agricultura, que es otra gran consumidora de agua y energía, lo que ha llevado a una mayor dependencia de fuentes alternativas de energía, algunas de las cuales pueden ser más costosas o menos sostenibles.





Gráfico 2. Variación de caudales de ríos



Fuente: Dirección General de Aguas (Ministerio de Obras Públicas)

Además, los patrones de consumo energético también están siendo modificados por el cambio climático. Las estaciones son cada vez menos predecibles y pueden alterar, por ejemplo, la temporada agrícola, llevando a los agricultores a usar más energía para irrigación en momentos inusuales del año. También hay un cambio en el comportamiento de los consumidores, con una mayor inversión en tecnologías eficientes y en sistemas de climatización para hacer frente a temperaturas extremas.

Más aún, es esencial identificar los sectores y actividades más vulnerables a los efectos del cambio climático en relación con la demanda energética. La agricultura, por ejemplo, es un sector altamente sensible a las variaciones climáticas. En Chile, la agricultura depende en gran medida del riego, y el incremento de las temperaturas, sumado a que las estaciones son cada vez menos predecibles, lo que puede alterar, por ejemplo, la temporada agrícola, podría gatillar una mayor demanda de agua y, por lo tanto, energía para su bombeo.

El sector industrial, principalmente el minero, es otro gran consumidor de energía. El agotamiento de los recursos hídricos y las altas temperaturas pueden influir en los procesos productivos y, consecuentemente, en sus patrones de consumo energético. Tomando como ejemplo el norte chileno y su industria minera, la disminución en la disponibilidad de agua podría elevar los costos de extracción y procesamiento de minerales, obligando a la industria a buscar soluciones energéticas más eficientes o alternativas.



---

### 2.2.2. Amenazas Naturales e Infraestructura Energética

El desafío de garantizar un suministro energético estable y confiable se amplía cuando se consideran las amenazas naturales que pueden impactar la infraestructura energética. Estas amenazas varían en naturaleza, intensidad y frecuencia, y poseen el potencial de interrumpir, dañar o incluso destruir componentes vitales del sistema energético. Chile, debido a su extensión geográfica y diversidad topográfica, está expuesto a una variedad de estas amenazas, cada una con sus propios retos y consideraciones.

Una de las amenazas más reconocidas en Chile son los movimientos sísmicos. Ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, el país ha experimentado algunos de los sismos más poderosos registrados. Estos eventos pueden causar daños graves en la infraestructura de generación, transmisión y distribución de energía. Un ejemplo claro es el terremoto de 2010, que, aparte de los significativos daños humanos y materiales, causó interrupciones en el suministro eléctrico en vastas regiones del país, afectando la vida cotidiana y la economía. Las infraestructuras energéticas, especialmente las plantas de generación y las torres de transmisión, requieren diseños antisísmicos para minimizar el impacto de estos eventos.

En relación con los terremotos, los tsunamis representan otra amenaza, especialmente para las infraestructuras energéticas ubicadas en la costa. La inundación repentina puede comprometer las operaciones y causar daños estructurales en instalaciones como refinerías, centrales eléctricas y redes de distribución. Es esencial considerar barreras y sistemas de alerta temprana para estas instalaciones costeras.

Chile también se ve afectado por erupciones volcánicas, debido a la gran cantidad de volcanes activos en su territorio. Las cenizas pueden obstruir y dañar equipos, interrumpiendo operaciones y afectando la distribución de energía. Las represas hidroeléctricas, por ejemplo, pueden ver alterada su operación si las cuencas de captación son afectadas por cenizas volcánicas.

Los incendios forestales, exacerbados por condiciones de sequía y aumentos de temperatura, representan otra amenaza creciente. Estos pueden dañar líneas de transmisión, postes y otras infraestructuras asociadas, y en muchos casos provocar cortes en el suministro eléctrico. La recurrencia de estos incendios en regiones como la del Biobío y la Araucanía ha resaltado la necesidad de robustecer y proteger la infraestructura crítica.

Las inundaciones y aluviones, especialmente en áreas propensas a fuertes lluvias estacionales o con topografía montañosa, pueden dañar infraestructuras a nivel del suelo, inundar centrales eléctricas y



obstruir represas. La región de Atacama, que suele ser árida, experimentó esto en 2015, cuando lluvias inusuales causaron aluviones que afectaron comunidades y también infraestructuras clave.

Finalmente, la sequía, fenómeno cada vez más frecuente y prolongado, tiene un impacto directo en la generación hidroeléctrica. Reservorios con niveles bajos limitan la capacidad de generación, lo que puede llevar a un mayor uso de fuentes no renovables, alterando la matriz energética del país.

En resumen, la infraestructura energética en Chile enfrenta desafíos significativos ante las amenazas naturales y exacerbadas por el cambio climático, que demandan una planificación y diseño responsable, adaptación y medidas de prevención. Es fundamental contar con sistemas resilientes que puedan resistir y adaptarse a estas adversidades, garantizando la seguridad y continuidad del suministro energético esencial para el desarrollo y bienestar de la nación. En el punto 2.4 se profundiza en estos temas.

La relación entre vulnerabilidad y resiliencia es fundamental para comprender cómo las infraestructuras y sistemas, en particular el energético, pueden prepararse y responder a amenazas y perturbaciones. Si bien ambos conceptos están interrelacionados, cada uno aporta una perspectiva única sobre cómo se abordan y gestionan los riesgos.

### 2.2.3. Interacciones entre Vulnerabilidad y Resiliencia

La vulnerabilidad, en su esencia, se refiere a la susceptibilidad de un sistema a sufrir daños o interrupciones significativas debido a factores externos o internos. En el contexto del sector energético chileno, la vulnerabilidad podría estar relacionada con la dependencia de una fuente específica de energía, la ubicación geográfica de las infraestructuras o la falta de diversificación en la matriz energética. Por ejemplo, si un país depende en gran medida de la energía hidroeléctrica y enfrenta periodos prolongados de sequía, esa dependencia se convierte en una vulnerabilidad.

Por otro lado, la resiliencia, según la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030, da cuenta de un proceso dinámico asociado a la capacidad de un sistema y de sus componentes, tales como población, infraestructura, servicios, medios de vida o medio ambiente, entre otros, para anticipar, resistir, absorber, adaptar y recuperarse de los efectos de un evento, de manera integral, oportuna y eficaz, incluso garantizando la preservación, restauración o mejora de sus estructuras y funciones básicas. Permite dimensionar la habilidad de un sistema con la cual una comunidad se recupera inmediatamente posterior a la ocurrencia de un evento, y cómo supera el estado existente previo al desastre. Cuentan para la evaluación de la resiliencia aspectos como la redundancia, rapidez, robustez y habilidad..



Un sistema resiliente no es necesariamente inmune a las amenazas, pero está mejor equipado para enfrentarlas y recuperarse de ellas. Siguiendo con el ejemplo anterior, si bien Chile podría tener una dependencia significativa de la energía hidroeléctrica, si ha invertido en tecnologías de almacenamiento de energía, diversificación de fuentes y redes inteligentes, entonces posee una mayor resiliencia ante las sequías.

En este sentido, la resiliencia del sector energético puede analizarse desde dos puntos de vista (GIZ y Ministerio de Energía, 2023b), la resiliencia de la infraestructura donde el riesgo se enfoca en el componente y el proceso en su disponibilidad en el tiempo buscando minimizar los daños a la infraestructura, asegurar que esté disponible en estado operativo la mayor parte del tiempo, o vuelva al estado operativo lo más pronto posible en las situaciones en que es necesaria. Y, por otra parte, la resiliencia del servicio de suministro donde el análisis de riesgo es más complejo, involucra la disponibilidad de los componentes y el foco central es el proceso de suministro.

Lo interesante es cómo estos dos conceptos (vulnerabilidad y resiliencia) se intersectan y se influyen mutuamente. Reducir la vulnerabilidad a menudo conduce a un aumento en la resiliencia. Si el sistema energético chileno, por ejemplo, identifica su vulnerabilidad a la interrupción de la energía importada y trabaja para aumentar la producción interna y diversificar sus fuentes, no solo está disminuyendo esa vulnerabilidad específica, sino que también está aumentando su capacidad general de resiliencia.

Sin embargo, la relación no es siempre lineal. Es posible que al abordar una vulnerabilidad se introduzca otra. Si Chile optara por diversificar su matriz energética invirtiendo masivamente en una única fuente alternativa, podría estar introduciendo una nueva vulnerabilidad si esa fuente resulta ser inconsistente o enfrenta sus propios desafíos en el futuro.

La clave para una gestión eficaz radica en la capacidad de balancear y entender estas interacciones. La planificación estratégica, que se basa en evaluaciones de riesgo y escenarios futuros, puede ayudar a identificar y priorizar las áreas de vulnerabilidad. Una vez identificadas, las estrategias de mitigación y adaptación pueden ser diseñadas para fortalecer la resiliencia.

En el contexto chileno, dada su geografía y diversidad climática, esta interacción entre vulnerabilidad y resiliencia es especialmente pertinente. Los desafíos asociados con su ubicación tectónica, variabilidad climática y dependencia de ciertas fuentes de energía requieren una visión estratégica que aborde ambos conceptos de manera holística.

En conclusión, la interacción entre vulnerabilidad y resiliencia es central para la gestión de riesgos y la planificación en el sector energético. Al comprender y actuar sobre estas dinámicas, Chile puede



---

asegurar un suministro energético estable y sostenible para el futuro, independientemente de los desafíos que pueda enfrentar.

#### 2.2.4. Factores Sociales y Económicos

El impacto y respuesta de la infraestructura energética ante distintos desafíos no es únicamente un tema técnico o ambiental. Los factores sociales y económicos juegan un papel crucial en la determinación de la vulnerabilidad y resiliencia de los sistemas energéticos. Estos factores no sólo dictan cómo y dónde se desarrolla la infraestructura, sino también cómo las comunidades y la economía reaccionan y se adaptan a los cambios o perturbaciones en el suministro energético.

Desde una perspectiva social, la equidad en el acceso a la energía es un factor fundamental para evaluar la vulnerabilidad de un sistema. En sociedades donde el acceso a la energía es desigual, los segmentos más desfavorecidos son más propensos a sufrir las consecuencias de interrupciones o cambios en el suministro. Estos grupos, a menudo con menos recursos y capacidades de adaptación, enfrentan mayores desafíos en términos de salud, educación y bienestar cuando se ven privados del acceso a energía. En el caso de Chile, la geografía diversa del país ha presentado desafíos históricos para garantizar el acceso equitativo a la energía en zonas rurales o remotas, comparado con las áreas urbanas más densamente pobladas.

Económicamente, la energía es un insumo esencial para casi todos los sectores de la economía. Interrupciones o aumentos significativos en los costos energéticos pueden tener consecuencias en cadena, afectando la producción, el empleo y el bienestar económico general. La resiliencia económica a estas perturbaciones se ve influenciada por la diversidad del tejido productivo, la capacidad de inversión en tecnologías más eficientes y la flexibilidad para adaptarse a nuevos paradigmas energéticos.

Chile, con una economía fuertemente ligada a la exportación de materias primas como el cobre, ha experimentado de primera mano cómo la variabilidad en los costos energéticos puede afectar directamente la competitividad de sus productos en los mercados globales. A su vez, el impulso hacia fuentes de energía renovable no sólo busca mitigar la vulnerabilidad a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, sino que también aspira a posicionar a Chile como líder en energías limpias, creando nuevas oportunidades económicas.

Otro aspecto crucial es el impacto social y económico post-eventos adversos. Por ejemplo, tras grandes terremotos, las comunidades afectadas no sólo enfrentan la pérdida de infraestructura, sino también la posibilidad de desplazamientos, pérdida de empleos y un largo proceso de recuperación económica. La



velocidad y eficacia con la que se restablezca el suministro energético puede determinar la rapidez de la recuperación socioeconómica.

Finalmente, es vital considerar el componente humano. La percepción pública sobre proyectos energéticos puede influir significativamente en su desarrollo y operación. En Chile, diversos proyectos han enfrentado resistencias locales debido a preocupaciones ambientales o territoriales. Asegurar una participación activa y significativa de las comunidades en las decisiones energéticas es esencial para construir sistemas que no sólo sean técnicamente robustos, sino también socialmente aceptados y económicamente viables.

#### 2.2.5. Diversificación de Fuentes de Energía

La diversificación de fuentes de energía es fundamental para aumentar la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad de los sistemas energéticos nacionales. Al reducir la dependencia de una sola fuente o de un grupo reducido de ellas, un país puede protegerse mejor contra interrupciones del suministro y volatilidad de precios, asegurando así un suministro energético constante y confiable. Además, esta diversificación no solo mitiga riesgos, sino que también permite aprovechar oportunidades en el cambiante escenario energético global, como el potencial de la energía renovable, que ofrece un suministro sostenible y a largo plazo con menores emisiones de gases de efecto invernadero y costos decrecientes gracias al avance tecnológico.

Chile ofrece un ejemplo ilustrativo de los beneficios de la diversificación energética. Con una geografía que gatilla un potencial para la generación de energía solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica. Aunque en el pasado, el país dependía en gran medida de las importaciones de combustibles fósiles, en los últimos años se han realizado esfuerzos intersectoriales para diversificar su matriz y aprovechar sus abundantes recursos renovables. De cualquier modo, como se verá más adelante, lo anterior no ha significado que sigamos, aun dependiendo de la generación energética a partir de combustibles fósiles.

Esta transición hacia fuentes de energía más diversificadas ha ofrecido a Chile una serie de ventajas. Ambientalmente, ha contribuido a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la consecución de sus compromisos en el ámbito del Acuerdo de París sobre cambio climático. Socialmente, la transición hacia fuentes de energía más limpias ha sido recibida con entusiasmo por amplios sectores de la población, que ven en ella una oportunidad para un desarrollo más sostenible y equitativo.

Sin embargo, la diversificación energética no está exenta de desafíos. A medida que se integran nuevas fuentes de energía al sistema, es esencial garantizar que la infraestructura existente pueda adaptarse a



las particularidades de cada fuente. Por ejemplo, la energía solar y eólica son intermitentes por naturaleza, lo que requiere soluciones innovadoras en términos de almacenamiento y gestión de la red.

En resumen, la diversificación de fuentes de energía representa una estrategia esencial para cualquier país que busque fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad de su sistema energético. Aunque los desafíos son significativos, las oportunidades en términos económicos, ambientales y sociales hacen que el esfuerzo valga la pena.

#### 2.2.6. Políticas de Adaptación

La adaptación al cambio climático y a las amenazas naturales es fundamental para garantizar un futuro energético sostenible y resiliente. Las políticas de adaptación, que abordan estos desafíos mediante la planificación, regulación e implementación de estrategias específicas, son esenciales para proteger y optimizar los sistemas energéticos frente a amenazas presentes y futuras. Estas políticas tienen el potencial no solo de mitigar los daños, sino también de aprovechar oportunidades emergentes en el sector energético.

Las políticas de adaptación no son soluciones estáticas, sino respuestas flexibles y evolutivas a una serie de amenazas cambiantes y a menudo impredecibles. Requieren una combinación de investigación, observación, planificación estratégica y, lo que es más importante, acción. Para ser efectivas, estas políticas deben ser inclusivas, equitativas y basadas en datos y evidencia sólida.

Chile, debido a su diversidad geográfica y climática, se enfrenta a una variedad de amenazas relacionadas con el clima, desde sequías en el norte hasta inundaciones en el sur. Estas amenazas, junto con eventos geológicos como terremotos y erupciones volcánicas, tienen el potencial de impactar significativamente la infraestructura y la capacidad energética del país.

Un enfoque de Chile en el ámbito de la adaptación es su compromiso con la planificación anticipada y la integración intersectorial. Reconociendo la interdependencia de la energía con otros sectores como el agua, el transporte y la industria, ha habido un impulso hacia políticas coordinadas que aborden múltiples desafíos simultáneamente. Por ejemplo, considerando la dependencia del suministro energético de Chile de sus recursos hídricos, en particular en la generación hidroeléctrica, las políticas de adaptación no solo se centran en la infraestructura energética en sí, sino también en la gestión sostenible del agua.

Además, Chile ha demostrado un interés en el desarrollo y aplicación de tecnologías innovadoras para mejorar la resiliencia energética. Aquí hay algunas áreas clave en las que Chile ha estado trabajando:



- **Transición hacia las Energías Renovables:** Chile ha realizado inversiones sustanciales en energías renovables no convencionales (ERNC) como la solar y eólica. El Desierto de Atacama, por ejemplo, es uno de los lugares más soleados del mundo y se ha convertido en un polo de desarrollo para la generación de energía solar.
- **Interconexión de Redes:** Chile ha trabajado en la interconexión de sus dos principales sistemas eléctricos, el SIC (Sistema Interconectado Central) y el SING (Sistema Interconectado del Norte Grande). Esta interconexión permite una distribución más eficiente de la energía y una mayor resiliencia en caso de fallos o interrupciones.
- **Almacenamiento de Energía:** Se han impulsado investigaciones y proyectos piloto relacionados con el almacenamiento de energía, especialmente usando baterías de litio (dado que Chile posee una de las mayores reservas de litio del mundo) y almacenamiento hidroeléctrico de bombeo.
- **Eficiencia Energética:** El Estado chileno ha implementado normativas y programas que fomentan la eficiencia energética en edificios, industrias y transporte, tal como la Ley 21.305 Sobre Eficiencia Energética, promulgada en 2021. Esto no solo reduce la demanda total de energía, sino que también mejora la resiliencia del sistema energético.
- **Diversificación de la Matriz Energética:** Chile ha buscado diversificar sus fuentes de energía, reduciendo la dependencia de importaciones de hidrocarburos y potenciando fuentes renovables, ya sea hídrica o no convencionales.
- **Desarrollo de Hidrógeno Verde:** Chile tiene un enorme potencial para producir hidrógeno verde a partir de fuentes renovables, y el país ha establecido planes estratégicos para convertirse en un líder en la producción y exportación de hidrógeno verde en las próximas décadas.
- **Investigación y Desarrollo:** A través de colaboraciones público-privadas, Chile ha fomentado la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas. Instituciones educativas y centros de investigación han trabajado en áreas como las redes inteligentes, que utilizan tecnología avanzada para monitorizar y responder a las fluctuaciones de demanda y suministro, energía marina y mejoras en la eficiencia de paneles solares.
- **Planes y Políticas Nacionales:** Chile ha delineado diversas políticas y planes estratégicos, como la Política Energética 2050, que establece objetivos claros para un sistema energético más sostenible, inclusivo y resiliente.

La colaboración interinstitucional y la participación del sector privado también son componentes clave de la estrategia de adaptación de Chile. El reconocimiento de que el desafío es demasiado grande para ser abordado por un solo sector ha llevado a la creación de asociaciones y colaboraciones que buscan combinar recursos, experiencia y conocimientos.





### 2.2.7. Impactos del Cambio Climático y Adaptación en el Sector Energético Chileno

La energía es uno de los pilares de cualquier economía moderna, y Chile no es la excepción. La seguridad, la confiabilidad y la sostenibilidad del suministro energético tienen implicaciones directas en el bienestar económico, social y ambiental. A través del análisis de los diferentes aspectos del sistema energético en relación con el cambio climático y las amenazas naturales, se pueden extraer varios aprendizajes clave para el contexto chileno.

- i. Influencia del cambio climático en la demanda energética: El cambio climático tiene el potencial de alterar significativamente los patrones de consumo de energía en Chile. A medida que las temperaturas aumentan, es probable que la demanda de energía para la refrigeración en verano crezca, mientras que la demanda de calefacción en invierno podría disminuir. Chile, con su geografía diversa y sus variados microclimas, necesita estrategias de adaptación específicas para cada región (GIZ y Ministerio de Energía, 2023a)<sup>2</sup>.
- ii. Amenazas naturales y resiliencia de la infraestructura energética: Chile es particularmente vulnerable a una serie de amenazas naturales, desde terremotos y tsunamis hasta sequías y erupciones volcánicas. La infraestructura energética, para ser sostenible a largo plazo, debe diseñarse y gestionarse con una visión resiliente, anticipando y preparándose para estas amenazas.
- iii. La dinámica entre vulnerabilidad y resiliencia: La vulnerabilidad y la resiliencia no son conceptos estáticos; evolucionan y se influyen mutuamente. Reducir la vulnerabilidad a través de medidas proactivas puede aumentar la resiliencia del sistema. Inversamente, sistemas energéticos con alta resiliencia pueden reducir su vulnerabilidad ante amenazas imprevistas.
- iv. Impacto de factores sociales y económicos: No todas las poblaciones tienen el mismo nivel de acceso a la energía, ni enfrentan los mismos riesgos en cuanto a su suministro. Las comunidades más vulnerables, tanto económicamente como geográficamente, requieren atención especial para garantizar que no se agraven las desigualdades existentes debido a interrupciones energéticas o costos crecientes.
- v. Importancia de la diversificación de fuentes de energía: La dependencia de Chile de una o dos fuentes primarias de energía lo hace susceptible a shocks en esos mercados específicos o a interrupciones debido a amenazas naturales. La diversificación hacia fuentes renovables, además de ser ambientalmente beneficiosa, puede proporcionar una capa adicional de seguridad e independencia del sistema energético.

<sup>2</sup> Para mayor información ver [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/giz-ebiz-2023\\_cambio\\_climatico\\_en\\_la\\_demanda\\_energetica.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/giz-ebiz-2023_cambio_climatico_en_la_demanda_energetica.pdf)



- vi. Necesidad de políticas de adaptación robustas: Para enfrentar los desafíos del siglo XXI, Chile necesita políticas energéticas que estén a la altura de la tarea. Esto implica la formulación y ejecución de políticas de adaptación que consideren tanto los riesgos actuales como los futuros, promoviendo la investigación, la innovación y la colaboración interinstitucional.

De este modo, el sistema energético de Chile se encuentra en un punto de inflexión. Las decisiones tomadas hoy en relación con la infraestructura, las inversiones y las políticas energéticas tendrán repercusiones durante décadas. Ante un futuro incierto, marcado por el cambio climático y las amenazas naturales, es esencial que Chile adopte un enfoque proactivo, basado en la resiliencia y la adaptación, para garantizar un suministro energético seguro y sostenible para todas sus comunidades.

## 2.3. Tipos de Amenazas Analizadas

### 2.3.1. Amenazas naturales a considerar

Chile, debido a su geografía y ubicación tectónica, es vulnerable a una serie de amenazas naturales que tienen el potencial de impactar significativamente su infraestructura energética. Este capítulo se centrará en tres de las más significativas: terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas.

#### 2.3.1.1. Terremotos

Tal como se mencionó anteriormente, Chile se ubica sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico, una región tectónicamente activa que ha sido testigo de algunos de los terremotos más potentes jamás registrados. La interacción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana ha generado un historial de sismos que han modelado su paisaje y cultura.

Los terremotos pueden causar daños devastadores en términos de su impacto sobre la infraestructura energética, principalmente en líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, depósitos de combustible, instalaciones de generación y otras instalaciones clave. Estos daños pueden resultar en cortes de energía, afectando tanto a áreas urbanas como rurales, y complicando aún más las operaciones de rescate y recuperación.

En respuesta a estos riesgos, Chile ha incorporado estándares de resiliencia sísmica en el diseño y construcción de infraestructura energética. La ingeniería sísmica avanzada y la planificación estratégica son fundamentales para garantizar que las instalaciones energéticas puedan resistir y recuperarse rápidamente después de un terremoto. A continuación, se detallan algunos de los esfuerzos y técnicas que Chile ha implementado en el ámbito de la infraestructura energética para enfrentar los desafíos sísmicos:



- Normativas estrictas: Las regulaciones nacionales para la construcción de infraestructuras, incluidas las energéticas, han evolucionado con el tiempo para incluir normas sísmicas estrictas. Estas normativas están basadas en investigaciones y lecciones aprendidas de terremotos anteriores<sup>3</sup>. Entre ellas están la NCh 433 (diseño sísmico de edificios) y su Reglamento (D.S 61 Vivienda y Urbanismo), la NCh 2745 (análisis y diseño de edificios con aislación sísmica) o el Decreto 109 del Ministerio de Energía (Reglamento de seguridad de las instalaciones eléctricas destinadas a la producción, transporte, prestación de servicios complementarios, sistemas de almacenamiento y distribución de energía eléctrica).
- Diseño con base aislada: Esta técnica implica la construcción de edificios o estructuras sobre amortiguadores que pueden absorber y disipar la energía sísmica, reduciendo significativamente el movimiento transmitido a la estructura (ver NCh 2745).
- Refuerzo y retrofitting: Las instalaciones energéticas más antiguas, que no fueron diseñadas con los estándares actuales, a menudo son reforzadas y modernizadas para cumplir con las normas modernas de resistencia sísmica.
- .
- Monitorización y alerta temprana: Se han implementado sistemas de monitoreo sísmico y alerta temprana para detectar terremotos y generar alertas, lo que permite tomar medidas preventivas, como el cierre automático de ciertas instalaciones o la desconexión de redes, en caso de sismo.
- Capacitación y simulacros: Los operadores y trabajadores de instalaciones energéticas reciben capacitación regular sobre procedimientos de emergencia y respuesta sísmica. Los simulacros son comunes y ayudan a preparar a las personas para actuar rápidamente en caso de terremoto.
- Evaluaciones post-sismo: Después de un evento sísmico significativo, se lleva a cabo una revisión y evaluación exhaustiva de las infraestructuras para identificar y reparar cualquier daño y para aprender y mejorar las prácticas y diseños actuales.

### 2.3.1.2. *Tsunamis*

Los terremotos submarinos en el Océano Pacífico tienen el potencial de generar tsunamis, ondas gigantes que pueden llegar a la costa con poco aviso. Dado el extenso borde costero de Chile, esta amenaza es especialmente pertinente.

---

<sup>3</sup> Para ver la evolución normativa, ver por ejemplo <https://quieromibarrío.cl/wp-content/uploads/2016/04/Presentaci%C3%B3n-Ditec-Minvu.pdf> o [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=915494](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915494)



En este sentido, las instalaciones energéticas ubicadas en la costa, muchas de las cuales están asociadas a combustibles del tipo hidrocarburos, están en riesgo de inundación y daños estructurales durante un tsunami, incluyendo puertos y plantas de gas natural o de llegada y desembarco de crudo. Además, las ondas pueden arrastrar escombros que impactan las estructuras, exacerbando el daño.

Los tsunamis, además de causar daños inmediatos, pueden tener efectos a largo plazo en la infraestructura energética. La salinización de los sistemas eléctricos y de generación de energía debido al agua del mar puede conducir a la corrosión, lo que afecta la longevidad de la infraestructura y aumenta los costos de mantenimiento. De igual manera, la destrucción de infraestructura portuaria puede interrumpir el suministro de recursos energéticos importados, como petróleo y gas natural, exacerbando las crisis energéticas.

La elevación de infraestructuras críticas, como las subestaciones eléctricas y las plantas generadoras, puede ser una solución efectiva para reducir el impacto de los tsunamis. Además, las barreras y muros de contención, junto con sistemas de alerta temprana, pueden ser vitales para proteger las instalaciones y permitir evacuaciones oportunas.

### *2.3.1.3. Erupciones Volcánicas*

Chile cuenta unos 90 volcanes potencialmente activos, de los cuales aproximadamente 60 tienen registro histórico de su actividad (Sernageomin, 2020)<sup>4</sup>. Si bien las erupciones volcánicas son menos frecuentes que los terremotos, sus consecuencias pueden ser igualmente perjudiciales.

Las erupciones pueden causar interrupciones en la generación y distribución de energía debido a la caída de cenizas, flujos piroclásticos y lahares. Las cenizas volcánicas, al acumularse, pueden dañar estructuras, obstruir sistemas de ventilación y afectar la operación de maquinarias. Esto dado que puede infiltrarse en mecanismos delicados de las instalaciones energéticas, desde turbinas hasta sistemas de refrigeración, afectando su eficiencia y requiriendo costosos esfuerzos de limpieza y mantenimiento. Las nubes de ceniza también pueden interferir con las redes de transmisión aérea y sistemas de radar, complicando aún más las operaciones. Además, las erupciones volcánicas pueden generar flujos de lahares que destruyen todo a su paso, incluidas estructuras construidas para ser robustas, como represas hidroeléctricas.

La monitorización constante de los volcanes activos y la implementación de sistemas de alerta temprana son fundamentales. La ubicación estratégica de infraestructuras energéticas, alejándolas de

---

<sup>4</sup> <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2020/09/mapa-libro-ranking-2020-final.pdf>



---

zonas de alta amenaza volcánica, así como el desarrollo de protocolos de respuesta rápida, pueden minimizar el impacto de estas erupciones.

### 2.3.2. Amenazas exacerbadas por el cambio climático

A continuación, se presentan los efectos y posibles mitigaciones de las principales amenazas exacerbadas por el cambio climático de importancia en Chile: olas de calor, marejadas, aluviones, sequía e inundaciones.

#### 2.3.2.1. *Olas de Calor*

Las olas de calor son un fenómeno meteorológico que consiste en periodos de temperaturas anormalmente altas, que se mantienen durante varios días consecutivos. Estos episodios extremos de calor, aunque pueden ser subestimados por su naturaleza menos destructiva en comparación con terremotos o tsunamis, tienen efectos perjudiciales profundos en la infraestructura energética y en la población. Al evaluar la amenaza que representan las olas de calor para Chile, es esencial abordar sus múltiples dimensiones.

##### Aumento en la Demanda Energética

El aumento de las temperaturas lleva a una mayor demanda de energía, especialmente en áreas urbanas, donde el efecto isla de calor intensifica aún más las temperaturas. La necesidad de climatización en hogares, oficinas e instalaciones industriales crece exponencialmente. Esta demanda pico puede llevar a los sistemas de energía al límite de su capacidad, resultando en cortes de energía o en la necesidad de importar energía a precios más altos. Un análisis en profundidad se encuentra en (GIZ y Ministerio de Energía, 2023a).

##### Daños en la Infraestructura

El calor excesivo puede afectar la eficiencia de las líneas de transmisión eléctrica, dado que a medida que los cables se calientan, su resistencia aumenta, lo que puede resultar en pérdidas de energía más significativas. Para conductores típicos de aluminio o cobre, la resistencia eléctrica aumenta aproximadamente un 0,4% por cada aumento de 1°C en la temperatura, por lo tanto, si una línea aumenta su temperatura en 25°C, podría ver un aumento del 10% en la resistencia. Si las temperaturas superan ciertos límites, puede ser necesario desconectar o limitar la carga en algunas líneas para evitar daños o fallas. Esto también afecta de forma similar a las redes de distribución eléctrica.



Por otra parte, las plantas de generación de energía, especialmente aquellas que requieren refrigeración, como las termoeléctricas, pueden ver su eficiencia reducida debido a la alta temperatura del agua o del aire. En casos extremos, esto podría llevar a la paralización temporal de estas plantas.

#### Impacto en Fuentes de Energía Renovable

Si bien las energías renovables ofrecen una solución prometedora a los desafíos energéticos, no están exentas de los efectos de las olas de calor. Los paneles solares, por ejemplo, pierden eficiencia a temperaturas extremadamente altas. Por otro lado, la sequía asociada a olas de calor prolongadas puede reducir el rendimiento de las plantas hidroeléctricas, ya que los niveles de agua en los embalses pueden ser insuficientes para generar electricidad de manera óptima (por la excesiva evaporación y falta de precipitaciones).

#### Vulnerabilidad de Poblaciones Específicas

Las consecuencias de las olas de calor y la posible interrupción del suministro de energía tienen un impacto desproporcionado en ciertas poblaciones. Los ancianos, los enfermos y aquellos en comunidades desfavorecidas pueden no tener los medios para afrontar el calor extremo. Las interrupciones en el suministro eléctrico, por lo tanto, pueden resultar en tragedias, especialmente si se prolongan<sup>5</sup>.

#### Estrategias de Adaptación y Mitigación

Dado el aumento en la frecuencia y severidad de las olas de calor debido al cambio climático, es esencial implementar estrategias adaptativas:

- Diversificación del suministro: Depender menos de fuentes de energía que requieran grandes cantidades de agua para la refrigeración.
- Actualización de infraestructura: Rediseñar y actualizar sistemas de transmisión y generación para que puedan operar de manera óptima en condiciones de calor extremo.
- Inversión en tecnologías de almacenamiento: Implementar soluciones de almacenamiento de energía para manejar demandas pico durante las olas de calor. Sin embargo, estas alternativas también pueden verse afectadas por estas mismas condiciones extremas. Las olas de calor pueden impactar la eficiencia y la longevidad de los sistemas de almacenamiento de energía, como las baterías. Estos sistemas a menudo requieren condiciones de temperatura controlada

---

<sup>5</sup> Para mayor información revisar la siguiente nota, que contiene referencias a diferentes estudios: <https://news.stanford.edu/2023/08/14/heat-affects-vulnerable/>



para operar de manera óptima. El calor excesivo puede reducir su eficiencia y acelerar el deterioro. Por lo tanto, es esencial considerar medidas de protección y refrigeración adecuadas para estos sistemas en áreas propensas a altas temperaturas.

- Promoción de la eficiencia energética: Fomentar prácticas y tecnologías que reduzcan el consumo de energía en edificios y hogares, disminuyendo así la demanda pico durante episodios extremos.

#### 2.3.2.2. *Incendios como una amenaza la infraestructura energética*

Los incendios, especialmente aquellos de origen forestal, representan una amenaza significativa para la infraestructura energética y el suministro constante de electricidad. No solo pueden causar daños directos al consumir estructuras e instalaciones, sino que pueden tener repercusiones a largo plazo que alteran la forma en que concebimos y planificamos la infraestructura energética.

#### Efectos Directos en la Infraestructura

Cuando un incendio se aproxima o consume una instalación de generación o transmisión de energía, los daños pueden ser inmediatos y devastadores. Los postes de electricidad, las subestaciones y las líneas de transmisión son susceptibles al fuego. De hecho, muchas líneas de transmisión y subestaciones se encuentran en áreas rurales, para conectar centros de generación remotos con áreas urbanas y estas zonas pueden contener vegetación seca o matorrales altamente combustibles, sobre todo en época estival, y ser por ende ser terrenos propensos a la ocurrencia de incendios forestales. Esta susceptibilidad se ve aumentada por diversas razones, tales como:

- Las subestaciones contienen equipos eléctricos que pueden ser sensibles al calor. Un incendio cercano puede elevar la temperatura local, haciendo que los equipos fallen o incluso causen explosiones, especialmente si contienen fluidos como aceites de transformador.
- Aislantes y otros componentes: Algunos materiales utilizados en las instalaciones, como aislantes, pueden ser inflamables o derretirse bajo altas temperaturas, comprometiendo la integridad de la infraestructura.
- Cables y líneas calientes: Las líneas de transmisión, al transportar electricidad, pueden calentarse. Si están cerca de vegetación seca o materiales combustibles, podrían ser un punto de ignición.
- La acumulación de residuos, como hojas secas o ramas alrededor de la infraestructura, puede proporcionar material adicional para la propagación del fuego. Además, las líneas de transmisión y distribución suelen estar elevadas del suelo, lo que las expone directamente a las llamas, especialmente en incendios de copa o en aquellos que ascienden colinas o terrenos



elevados. Igualmente, aunque las líneas eléctricas están diseñadas para estar aisladas, en situaciones extremas, como un incendio, el calor puede comprometer este aislamiento, aumentando el riesgo de cortocircuitos y fallas.

- El calor intenso de un incendio puede debilitar estructuralmente los postes y torres de transmisión, llevando a su colapso y a interrupciones en el suministro eléctrico. Además, muchos postes eléctricos aún están hechos de madera, un material combustible que puede arder fácilmente cuando está expuesto a fuego intenso.
- En el caso de instalaciones de generación, especialmente las centrales térmicas, si el suministro de agua o aire para refrigeración se interrumpe debido a un incendio, los equipos pueden sobrecalentarse y ser más susceptibles al fuego.

Las instalaciones eléctricas que no tienen barreras o defensas contra incendios, las hace vulnerables a la propagación del fuego.

#### Efectos Directos en la Infraestructura

Cuando un incendio se aproxima o consume una instalación de generación o transmisión de energía, los daños pueden ser inmediatos y devastadores. Los postes de electricidad, las subestaciones y las líneas de transmisión son susceptibles al fuego. En particular, las líneas aéreas, que cruzan extensas áreas, a menudo pasan por regiones de densa vegetación, convirtiéndose en puntos vulnerables. En Chile, un país con vastos bosques y un clima que favorece la propagación de incendios en ciertas temporadas, la amenaza es aún más palpable.

#### Interrupciones y Desconexiones Preventivas

Un incendio cercano puede llevar a las empresas de energía a desconectar proactivamente las líneas de transmisión como medida preventiva, incluso si el fuego no llega a tocar directamente la infraestructura. Estas desconexiones, aunque necesarias desde el punto de vista de la seguridad, pueden causar interrupciones significativas del suministro eléctrico. En regiones de Chile donde los incendios forestales son recurrentes, estas interrupciones pueden ser una preocupación anual.

#### Causas Vinculadas a la Infraestructura

Aunque puede sonar paradójico, en ocasiones la infraestructura energética misma puede ser una fuente de incendios. Chispas o arcos eléctricos pueden encender la vegetación seca circundante, especialmente en condiciones de sequía. Este hecho refuerza la importancia de un adecuado mantenimiento y gestión del entorno de las instalaciones eléctricas.





---

### Impacto Económico y de Planificación

Los incendios pueden conllevar un alto costo económico para las empresas de energía. Más allá de los daños directos a la infraestructura, hay costos asociados con la reparación y reconstrucción, la compensación a los clientes por interrupciones y la potencial pérdida de ingresos. Estos desafíos pueden impulsar a las empresas y al gobierno a reconsiderar la planificación y el diseño de la infraestructura, buscando soluciones más resilientes.

### Medidas Preventivas y Estrategias de Adaptación

Para enfrentar la amenaza de los incendios, es esencial adoptar una serie de medidas:

- **Gestión del Entorno:** Es fundamental mantener una distancia segura entre la infraestructura eléctrica y la vegetación, realizando podas regulares y limpiezas.
- **Tecnologías de Detección Temprana:** Implementar sistemas que puedan detectar rápidamente cambios en la temperatura o la presencia de humo cerca de infraestructuras críticas.
- **Diseño Resiliente:** Optar por materiales y diseños que minimicen el riesgo de incendio, y que permitan una rápida recuperación en caso de daño.
- **Planificación Estratégica:** Es crucial considerar los riesgos de incendio al planificar nuevas instalaciones. Esto puede implicar elegir ubicaciones menos propensas a incendios o considerar el uso de líneas subterráneas en áreas de alto riesgo.

#### *2.3.2.3. Marejadas: Amenazas Crecientes y Respuestas Adaptativas para la Infraestructura Energética*

Las marejadas, impulsadas por fenómenos meteorológicos intensos y exacerbadas por el aumento del nivel del mar debido al cambio climático, presentan desafíos significativos para las naciones costeras. Estas oleadas de alto mar, a menudo acompañadas por vientos fuertes, pueden tener efectos devastadores en la infraestructura costera. En particular, 116 establecimientos asociados a la producción y distribución de energía se encuentran emplazados en la costa chilena, entre ellos: 45 instalaciones de hidrocarburos, 24 termoeléctricas y 47 subestaciones eléctricas (Ministerio de Medio Ambiente, 2019).

### Impacto en la Infraestructura Energética

Chile, con su extensa costa que abarca una diversidad geográfica desde el árido desierto de Atacama en el norte hasta los glaciares y fiordos del sur, está particularmente expuesto a este tipo de amenaza. Algunas de las instalaciones energéticas, como centrales térmicas, subestaciones y redes de



distribución eléctrica, se encuentran cerca de la costa debido a las necesidades logísticas y operativas. Estas infraestructuras, al estar en zonas vulnerables, pueden sufrir daños directos durante eventos de marejadas.

Por ejemplo, las plantas de energía costeras pueden experimentar inundaciones, lo que puede dañar equipos esenciales y provocar cortes de energía. Además, las líneas de transmisión y las torres eléctricas pueden ser derribadas o dañadas por las marejadas, interrumpiendo el suministro eléctrico a áreas más amplias.

#### Agravantes Asociados al Cambio Climático

El cambio climático, con su efecto de elevación del nivel del mar y la potencial intensificación de eventos meteorológicos extremos, es probable que agrave la amenaza de las marejadas. En lugares como Valparaíso y Concepción, esto podría tener un efecto cascada, no solo dañando la infraestructura energética, sino también afectando otros servicios esenciales que dependen de un suministro eléctrico constante.

#### Medidas de Adaptación Específicas

Para hacer frente a las amenazas de las marejadas, es crucial incorporar medidas de adaptación específicas en la planificación, diseño y construcción de la infraestructura energética:

- Elevación de infraestructuras críticas: Esta estrategia implica elevar estructuras como subestaciones y plantas generadoras por encima del nivel proyectado de marejadas. Esto puede hacerse mediante pilotes, terraplenes o plataformas elevadas.
- Barreras de protección: Las barreras como diques, muros de contención y rompeolas pueden ser efectivas para proteger las infraestructuras costeras contra marejadas. En el caso chileno, podría explorarse la viabilidad de estos sistemas, especialmente en zonas de alta densidad poblacional y actividad industrial.
- Sistemas de alerta temprana: Estos sistemas pueden proporcionar advertencias anticipadas sobre eventos de marejadas, permitiendo la implementación de medidas preventivas, como el cierre de instalaciones vulnerables y la movilización de equipos de emergencia.
- Reubicación estratégica: En algunos casos, podría ser más viable reubicar ciertas infraestructuras energéticas fuera de zonas de alto riesgo, especialmente si los costos asociados a la protección y reparación superan los de una reubicación.



- Diseño resiliente: Implementar diseño y materiales que puedan resistir el embate de las marejadas, incluyendo estructuras flexibles o modulares que puedan adaptarse a condiciones cambiantes.
- Educación y capacitación: Las comunidades locales, las empresas de energía y las autoridades deben estar informadas sobre los riesgos asociados con marejadas y las medidas de adaptación disponibles.

#### *2.3.2.4. Aluviones: Desafíos y Estrategias para la Infraestructura Energética*

Los aluviones, también conocidos como flujos de detritos o inundaciones repentinas, se refieren a la rápida e intensa acumulación y desplazamiento de agua, lodo, rocas y otros materiales. Pueden ser desencadenados por fuertes lluvias, deshielo repentino o el colapso de barreras naturales como lagos glaciares. Este fenómeno, en particular, ha tenido un impacto significativo en la infraestructura energética en diversas regiones, y Chile, con su topografía montañosa y climatología variable, no es la excepción.

#### Daños Directos e Indirectos a la Infraestructura

El poder destructivo de un aluvión puede causar daños directos a las instalaciones energéticas. Las plantas generadoras, subestaciones y líneas de transmisión ubicadas en zonas vulnerables pueden quedar sumergidas, destruidas o desplazadas. Además, los sedimentos y escombros arrastrados por el flujo pueden acumularse en instalaciones hidroeléctricas, afectando su operación y eficiencia.

Indirectamente, los daños a carreteras y otras infraestructuras de transporte pueden dificultar el acceso para el mantenimiento y reparación de instalaciones energéticas, prolongando así las interrupciones del servicio.

#### Interrupción del Suministro

Más allá del daño físico, los aluviones pueden interrumpir la generación y distribución de energía. Las redes de transmisión dañadas o inundadas pueden causar apagones en áreas extensas, y si las rutas de acceso están bloqueadas, restablecer el servicio puede llevar tiempo.

#### Riesgos Asociados con Embalses y Represas

Chile cuenta con una serie de represas y embalses utilizados para la generación de energía hidroeléctrica. Un aluvión puede poner en peligro la integridad de estos embalses, no solo por el flujo directo de detritos sino también por el aumento repentino del nivel de agua. Un colapso o fallo



estructural podría tener consecuencias catastróficas no solo para la infraestructura energética, sino también para las comunidades río abajo.

### Estrategias de Adaptación y Mitigación

Para abordar los desafíos asociados con los aluviones, se necesitan estrategias proactivas:

- **Análisis de Vulnerabilidad y Zonificación:** Es esencial realizar estudios detallados para identificar áreas propensas a aluviones y zonificarlas adecuadamente, evitando o limitando la construcción de infraestructura energética en zonas de alto riesgo.
- **Diseño Resiliente:** Las instalaciones en zonas propensas a aluviones deben diseñarse o adaptarse para resistir el impacto de estos eventos. Esto podría incluir estructuras elevadas, barreras de contención o sistemas de drenaje eficientes.
- **Sistemas de Alerta Temprana:** Implementar sistemas de monitoreo y alerta para detectar y comunicar rápidamente la posibilidad de un aluvión. Estos sistemas pueden salvar vidas y dar tiempo para desconectar o proteger infraestructuras críticas.
- **Mantenimiento y Despeje:** Las represas y embalses deben ser regularmente inspeccionados y mantenidos. El despeje de sedimentos y escombros es esencial para garantizar que las instalaciones funcionen de manera óptima y segura.
- **Capacitación y Planificación de Emergencia:** Es fundamental que el personal encargado de la infraestructura energética esté bien capacitado para responder a emergencias relacionadas con aluviones, y que existan planes de acción claramente definidos.

#### 2.3.2.5. *Sequía*

Las sequías, definidas como períodos prolongados de déficit de precipitación, tienen una multiplicidad de impactos negativos en diversos sectores, siendo uno de los más afectados el energético. Dado que la generación de energía a menudo requiere grandes cantidades de agua, especialmente en el caso de la energía hidroeléctrica, las sequías pueden tener serias implicancias en la seguridad y estabilidad del suministro energético.

### Sequía y la Generación Hidroeléctrica

La generación hidroeléctrica es una de las principales fuentes de energía en muchos países, y Chile no es la excepción. Durante periodos de sequía, las reservas de agua en embalses y represas pueden disminuir significativamente, limitando la capacidad de generación de las plantas hidroeléctricas. Esta reducción de la capacidad puede llevar a déficits de energía, especialmente si no existen fuentes alternativas disponibles para compensar la disminución.



---

### Impacto en Plantas Termoeléctricas

Mientras que las plantas termoeléctricas no dependen directamente de la disponibilidad de agua para la generación de energía, sí la requieren para el proceso de enfriamiento. Las sequías pueden afectar la disponibilidad de agua para estas plantas, comprometiendo su eficiencia y, en casos extremos, llevando a su cierre temporal.

### Aumento de la Demanda Energética

Las sequías suelen coincidir con altas temperaturas, lo que puede conducir a un aumento en la demanda de energía debido al uso intensivo de sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Esta mayor demanda, combinada con la posible reducción en la generación, puede exacerbar los desafíos de suministro.

### Estrategias de Mitigación y Adaptación

Frente a la amenaza de la sequía, es esencial adoptar medidas estratégicas para garantizar la continuidad y la resiliencia del sistema energético:

- Diversificación de la matriz energética: Aumentar la proporción de fuentes de energía que no dependen de la disponibilidad de agua, como la eólica y solar.
- Eficiencia en el uso del agua: Implementar tecnologías que permitan a las plantas termoeléctricas y otras instalaciones usar agua de manera más eficiente.
- Recopilación de datos y monitoreo: Establecer sistemas robustos de monitoreo y análisis de datos meteorológicos para prever posibles sequías y adaptar la operación del sistema energético de acuerdo con las previsiones.
- Infraestructura de almacenamiento de agua: Incrementar la capacidad de almacenamiento de agua, tanto para generación hidroeléctrica como para el enfriamiento en plantas termoeléctricas.
- Promoción del uso eficiente de energía: Establecer programas de conciencia pública y educación sobre el uso eficiente de la energía, especialmente durante los periodos de sequía.

#### *2.3.2.6. Inundaciones: Desafíos y Respuestas para la Infraestructura Energética*

Las inundaciones, ya sean resultado de fenómenos climáticos extremos, desbordamiento de ríos, o marejadas, representan un peligro significativo para la infraestructura energética. En países con vastas áreas costeras y regiones propensas a lluvias intensas, como Chile, es vital entender los impactos potenciales y las respuestas adecuadas para garantizar la continuidad del servicio energético.



---

### Impactos Directos en la Infraestructura

- Daño a Instalaciones Energéticas: Las instalaciones situadas en zonas propensas a inundaciones pueden sufrir daños estructurales. Las subestaciones eléctricas, plantas generadoras, y líneas de transmisión, cuando inundadas, pueden experimentar cortocircuitos, daños en equipos y estructuras, y en casos extremos, fallos totales.
- Impacto en la Distribución: Las inundaciones pueden dañar postes de electricidad, líneas de distribución y otros componentes del sistema, lo que puede resultar en apagones extensos.
- Riesgo para Centrales Hidroeléctricas: Las inundaciones repentinas pueden ejercer una presión excesiva sobre las represas, con el potencial de causar desbordamientos o incluso fallos estructurales.

### Impactos Indirectos en el Sistema Energético

- Disrupción de Suministros Esenciales: Las inundaciones pueden interrumpir el suministro de combustibles esenciales para la generación de energía, ya sea bloqueando carreteras, dañando infraestructuras de transporte o afectando terminales y refinerías.
- Desafíos Logísticos: Las inundaciones pueden dificultar la movilidad, complicando las labores de reparación y mantenimiento y retrasando la restauración del servicio.
- Efectos Económicos: La recuperación de daños estructurales, la necesidad de importar energía y las pérdidas económicas debido a interrupciones pueden tener un impacto significativo en la economía.

### Estrategias de Mitigación y Adaptación

- Evaluación y zonificación: Realizar evaluaciones detalladas de riesgos de inundación, identificando zonas de alto riesgo y restringiendo la construcción de infraestructura energética crítica en esas áreas.
- Diseño resiliente: Construir infraestructuras energéticas con características que las hagan resistentes a inundaciones, como elevación de estructuras, barreras y sistemas de drenaje avanzados.
- Monitorización y sistemas de alerta temprana: Establecer sistemas de monitorización en tiempo real para ríos, represas y zonas costeras, y desarrollar sistemas de alerta temprana para prever y responder rápidamente a posibles inundaciones.
- Planes de respuesta de emergencia: Desarrollar y ensayar planes de respuesta específicos para inundaciones, que incluyan protocolos claros, asignación de responsabilidades y recursos preestablecidos.



- Incorporación de soluciones naturales: Fomentar la conservación y restauración de humedales, manglares y otras barreras naturales que actúan como esponjas y barreras contra las inundaciones.

### 2.3.3. Principales conclusiones sobre las amenazas consideradas en el análisis

Chile, con su ubicación geográfica y características topográficas, se encuentra vulnerable a una variedad de desastres naturales que pueden tener repercusiones significativas en su infraestructura energética y, por ende, en la calidad de vida de sus habitantes.

- Diversidad de amenazas: Una primera observación recae en la amplia diversidad de amenazas naturales que enfrenta Chile. Desde terremotos y tsunamis, propios de su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, hasta erupciones volcánicas y fenómenos meteorológicos exacerbados por el cambio climático. Esta diversidad requiere una planificación exhaustiva y adaptativa para garantizar la continuidad y seguridad en la provisión de energía.
- Infraestructura vulnerable: Cada amenaza presenta desafíos únicos para la infraestructura energética. Mientras que los terremotos pueden causar daños directos a subestaciones y líneas de transmisión, las erupciones volcánicas pueden provocar interrupciones debido a la acumulación de cenizas. Por su parte, tsunamis y marejadas pueden afectar gravemente a las infraestructuras costeras, revelando la necesidad de robustecer y adaptar dichas estructuras.
- Impacto económico y social: Más allá de los daños materiales, las amenazas naturales pueden tener repercusiones socioeconómicas amplias. Las interrupciones en el suministro energético afectan la vida diaria, la economía y pueden obstaculizar los esfuerzos de recuperación post-desastre. A esto se suma el potencial desplazamiento de poblaciones y la necesidad de reconstrucción, que conlleva costos económicos y sociales.
- Adaptación y mitigación: Si bien la amenaza de desastres naturales es constante y en muchos casos impredecible, las estrategias de adaptación y mitigación surgen como herramientas esenciales. Estas estrategias, que varían según el tipo de amenaza, pueden ir desde la incorporación de diseños sismorresistentes hasta la monitorización constante de volcanes activos y la educación pública sobre riesgos y medidas de prevención.
- Planificación Anticipada: La importancia de una planificación energética que anticipe y se prepare para estos desastres no puede subestimarse. Las lecciones aprendidas de eventos pasados y los avances tecnológicos en monitorización y alertas tempranas deben incorporarse en las políticas y estrategias nacionales para la infraestructura energética.
- Rol del cambio climático: Es esencial reconocer el papel del cambio climático en la exacerbación de algunas amenazas. Los eventos climáticos extremos, como olas de calor, eventos extremos



y aluviones tienen una mayor probabilidad de ocurrencia y severidad en el contexto del calentamiento global, lo que plantea desafíos adicionales para la resiliencia energética.

En resumen, la sección ha dejado en claro la imperativa necesidad de considerar, entender y planificar teniendo en cuenta las diversas amenazas naturales que pueden afectar la infraestructura energética. Para Chile, país marcado por su rica geografía y diversidad climática, abordar estas amenazas con proactividad y visión a futuro será esencial para garantizar un suministro energético confiable y sostenible en las décadas venideras.





Tabla 1. Tabla resumen sobre amenazas naturales y sus implicancias

	Terremotos	Tsunamis	Erupciones Volcánicas
Amenazas	Movimientos sísmicos intensos del terreno	Olas gigantes provocadas por actividad sísmica o deslizamientos submarinos	Expulsión violenta de magma, cenizas y gases desde un volcán
Impactos Principales	Daño estructural a infraestructura	Inundación de instalaciones costeras	Caída de cenizas en instalaciones
	Interrupciones en la transmisión de energía	Daños por la fuerza del agua	Flujos piroclásticos y lahares
	Fallas en sistemas de control y comunicación	Salinización de sistemas	Expulsión de gases tóxicos
Potenciales Daños	Colapso de torres de transmisión	Destrucción de infraestructura costera	Contaminación de sistemas de agua (esencial para algunas plantas)
	Daños en centrales de energía	Pérdida de equipos y maquinaria	Daño o bloqueo de infraestructura por lahares
	Deslizamientos de tierra afectando instalaciones		Daños en líneas de transmisión por acumulación de cenizas
Estrategias de Mitigación	Diseño antisísmico de infraestructura	Barreras costeras y diques	Zonificación y restricción de construcciones en áreas de riesgo
	Sistemas automáticos de desconexión	Elevación de infraestructuras críticas	Sistemas de filtrado y protección contra cenizas
	Capacitación y simulacros regulares	Sistemas de alerta temprana	Monitorización constante de actividad volcánica
Adaptación	Monitoreo y sistemas de alerta temprana	Planificación urbana considerando zonas de inundación	Infraestructura diseñada para soportar la caída de cenizas y flujos
	Redundancia y diversidad en rutas de transmisión	Sistemas de drenaje eficientes	Sistemas de evacuación y planes de emergencia en áreas cercanas a volcanes

Fuente: Elaboración propia



Tabla 2. Tabla resumen de amenazas exacerbadas por el cambio climático y sus implicancias

Amenaza	Impactos	Potenciales Daños	Estrategias de Mitigación	Estrategias de Adaptación
Olas de Calor	Aumento de la demanda de energía para refrigeración	Sobrecarga del sistema eléctrico, interrupciones en el suministro	Mejora de eficiencia energética, energía renovable	Sistemas de refrigeración eficientes
				Sistemas de alerta temprana
Incendios	Daño a infraestructura de transmisión y distribución	Interrupciones del suministro, costos de reparación elevados	Prevención de incendios, monitoreo satelital	Diseño resistente al fuego
				Estrategias de evacuación y respuesta de emergencia
Marejadas	Afectación de infraestructura costera	Daños a plantas de energía, subestaciones y líneas de transmisión	Barreras contra inundaciones, planificación costera	Elevación de infraestructuras críticas
				Sistemas de alerta temprana
Aluviones	Interrupciones en la generación y transmisión de energía	Daños a represas, plantas de energía y subestaciones	Monitoreo de condiciones climáticas	Diseño de infraestructura con sistemas de drenaje
				Planes de evacuación y respuesta
Sequía	Afecta la generación de energía hidroeléctrica	Disminución del suministro, dependencia de fuentes de energía más costosas	Diversificación de fuentes de energía	Almacenamiento de agua, tecnologías de conservación
				Sistemas de alerta temprana
Inundaciones	Daño a la infraestructura eléctrica	Interrupciones en el suministro, daño a las instalaciones	Barreras contra inundaciones, planificación costera	Diseño resistente a inundaciones
				Sistemas de alerta temprana

Fuente: Elaboración propia



---

### 3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN RELEVANTES PARA EL CASO DE CHILE

---

En esta sección se describe el proceso y fuentes de información consultadas para llevar a cabo el proceso de recopilación de información relativa a la infraestructura energética relevante para el caso de Chile. Para la ocasión han sido consultadas esencialmente fuentes de información públicas e independientes, de acceso libre, lo que permite a futuro la completa actualización de los antecedentes recopilados, lo que le otorga una propiedad de continuidad y vigencia en el tiempo a los análisis derivados de los procesamientos realizados.

#### 3.1. Principales instalaciones energéticas en Chile

Dentro del conjunto de instalaciones consideradas se cuentan aquellas asociadas a la infraestructura del sistema eléctrico en sus diferentes etapas (generación, transmisión y distribución) y también las relativas a instalaciones de hidrocarburos (oleoductos, gasoductos, terminales marítimos, plantas de regasificación y almacenes de combustible, entre los principales.). En cuanto al nivel de agregación de los antecedentes, la mayoría han sido recopilados al menos a nivel comunal, pero para efectos de su mejor presentación, se ha decidido emplear un nivel de agregación diferente, definiéndose para tal efecto 3 grandes Macrozonas<sup>6</sup> (Norte, Centro-Sur y Sur). A continuación, se presenta el resumen con el catastro de infraestructura levantado.

---

<sup>6</sup> La composición de las macrozonas considerada es la siguiente:  
Macrozona Norte: Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo.  
Macrozona Centro-Sur: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, Del Libertador General Bernardo O'Higgins, Del Maule, Ñuble, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.  
Macrozona Sur: Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y Magallanes y de la Antártica Chilena.



Tabla 3. Resumen de instalaciones de energía existentes en Chile, según Macrozona

Elemento	Unidad	Macrozona Norte	Macrozona Centro – Sur	Macrozona Sur	Total
Perímetro	[Km]	7.553,23	14.064,09	92.374,73	113.992,05
Área	[Km <sup>2</sup> ]	301.484,54	213.713,33	239.042,07	754.239,94
Región(es)	[N.º]	5	8	2	15
Provincia(s)	[N.º]	12	32	8	52
Comuna(s)	[N.º]	44	281	20	345
Centrales solares	[N.º]	15	1	0	16
Centrales termoeléctricas	[N.º]	34	86	17	137
Centrales biomasa	[N.º]	0	27	0	27
Centrales eólicas	[N.º]	11	5	3	19
Centrales hidroeléctricas	[N.º]	8	101	4	113
Concesiones geotérmicas de explotación	[N.º]	4	8	0	12
Líneas de transmisión	[N.º]	219,00	467,00	13,00	699,00
Cap. Instal. Centrales solares	[MW]	270,10	0,15	0,00	270,25
Cap. Instal. Centrales termoeléctricas	[MW]	5.485,24	6.552,33	145,46	12.183,03
Cap. Instal. Centrales biomasa	[MW]	0,00	450,90	0,00	450,90
Cap. Instal. Centrales eólicas	[MW]	740,80	93,95	5,72	840,47
Cap. Instal. Centrales hidroeléctricas	[MW]	279,21	6.365,97	20,70	6.665,88
Kms. Líneas de transmisión – 13 kV	[Km]	0,26	0,00	0,00	0,26
Kms. Líneas de transmisión – 14 kV	[Km]	6,43	0,00	0,00	6,43
Kms. Líneas de transmisión – 23 kV	[Km]	0,46	257,31	407,80	665,57
Kms. Líneas de transmisión – 33 kV	[Km]	69,00	213,97	69,07	352,04
Kms. Líneas de transmisión – 44 kV	[Km]	0,00	346,79	0,00	346,79
Kms. Líneas de transmisión – 66 kV	[Km]	715,86	3.896,35	7,98	4.620,19
Kms. Líneas de transmisión – 69 kV	[Km]	57,70	0,00	0,00	57,70
Kms. Líneas de transmisión – 100 kV	[Km]	48,90	0,00	0,00	48,90
Kms. Líneas de transmisión – 110 kV	[Km]	3.339,08	1.751,98	0,00	5.091,06
Kms. Líneas de transmisión – 154 kV	[Km]	0,00	1.440,12	0,00	1.440,12



“Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático”

Informe Final

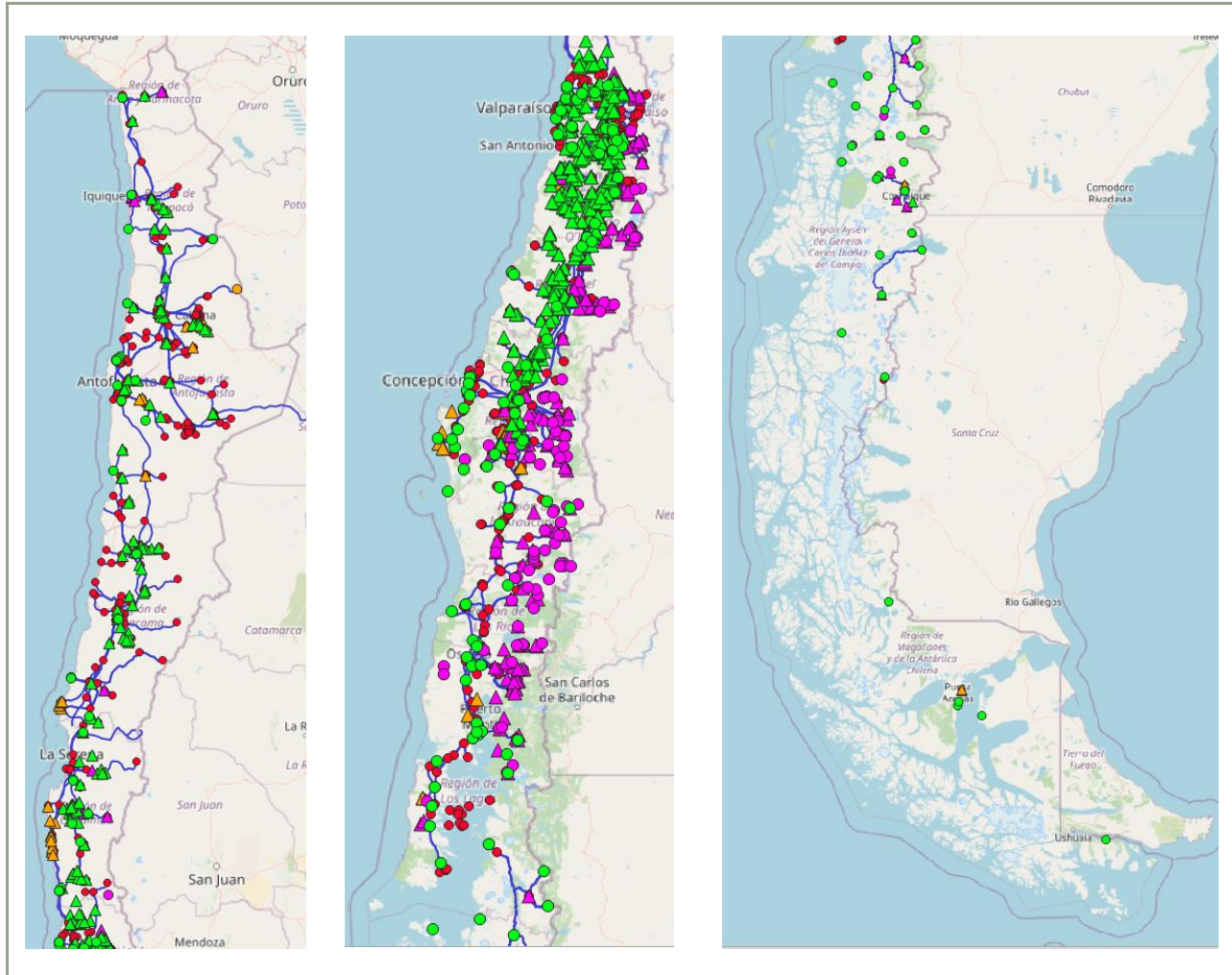
Elemento	Unidad	Macrozona Norte	Macrozona Centro – Sur	Macrozona Sur	Total
Kms. Líneas de transmisión – 220 kV	[Km]	6.912,12	5.750,49	0,00	12.662,61
Kms. Líneas de transmisión – 345 kV	[Km]	139,25	0,00	0,00	139,25
Kms. Líneas de transmisión – 500 kV	[Km]	0,00	2.332,32	0,00	2.332,32
Almacenes de combustible	[N.º]	19	38	9	66
Estaciones de servicio	[N.º]	222	1.535	48	1.805
Terminales marítimos	[N.º]	8	10	6	24
Concesiones eléctricas	[N.º]	8	44	2	54
Oleoducto	[N.º]	0	27	5	32
Longitud oleoductos	[Km]	0,00	2.680,02	478,06	3.158,08
Gaseoducto	[N.º]	18	25	22	65
Longitud gaseoductos	[Km]	1.962,49	1.628,57	467,19	4.058,25

Fuente: Elaboración propia en base a información de la Plataforma Energía Maps, CNE

A continuación, se presenta de forma gráfica las principales instalaciones del sistema eléctrico en Chile.



Figura 2. Principales instalaciones del sistema eléctrico en Chile

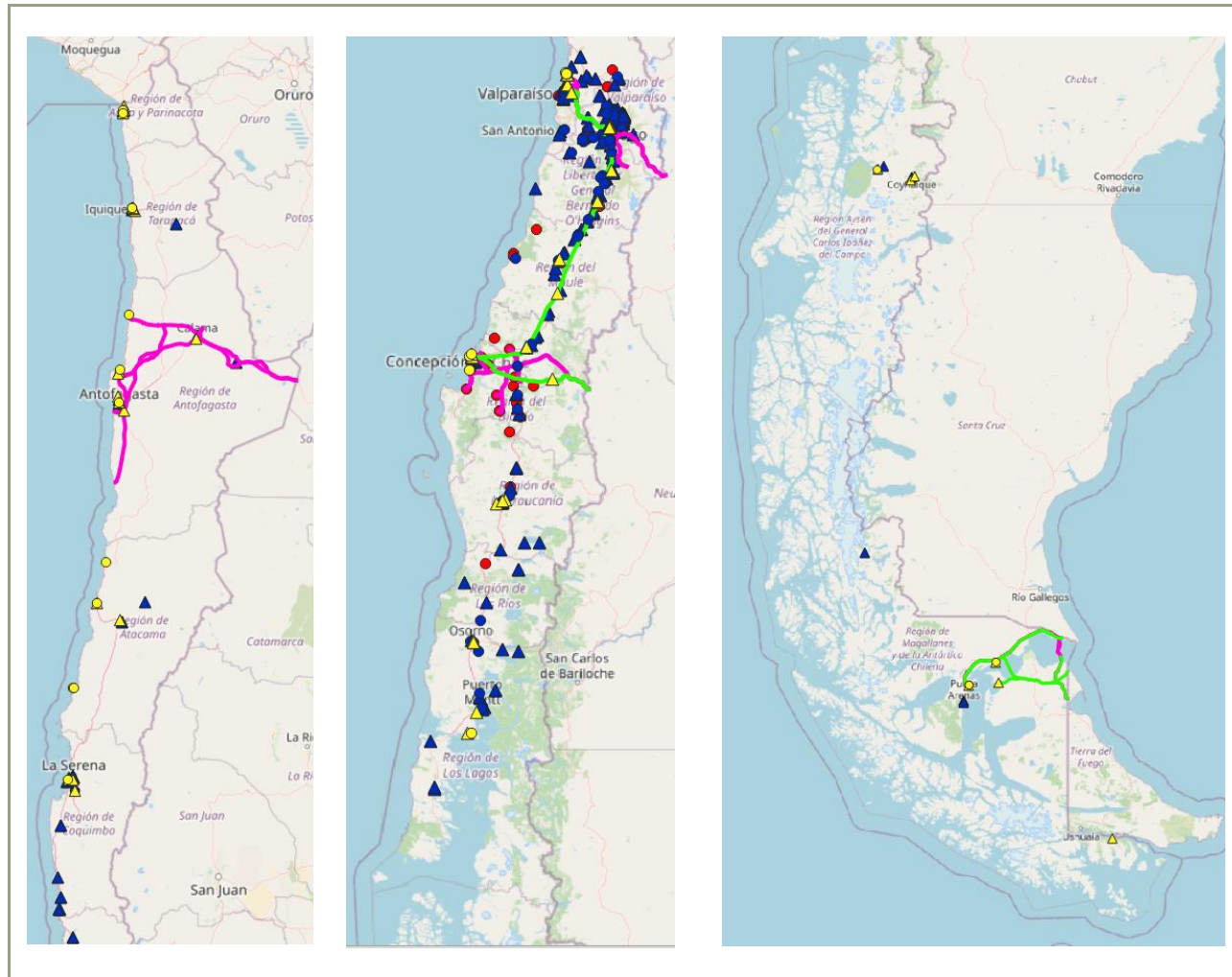


Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, se presentan las principales instalaciones del sistema de hidrocarburos para Chile.



Figura 3. Principales instalaciones del sistema de hidrocarburos en Chile

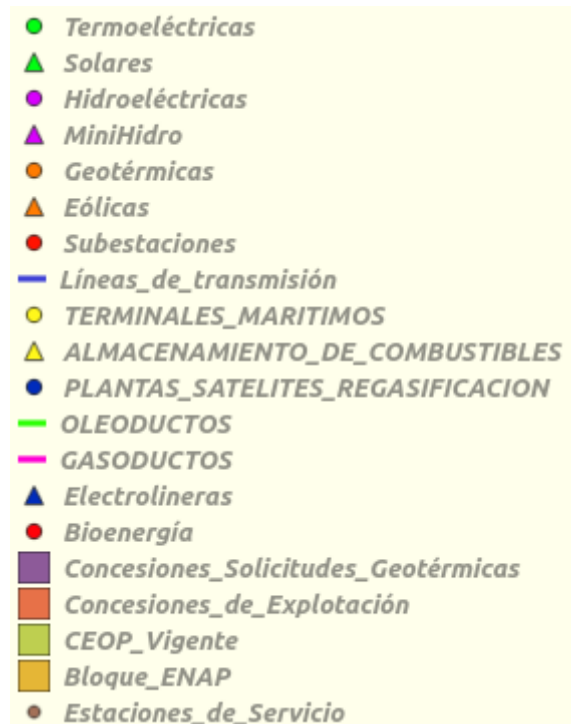


Fuente: Elaboración propia

La nomenclatura empleada para representar las instalaciones contenidas en las figuras anteriores se presenta a continuación.



Figura 4. Simbología empleada para representar las instalaciones del sistema eléctrico en Chile



Fuente: Elaboración propia

La clasificación climática utilizada es la de Wladimir Köppen, geógrafo, climatólogo y botánico alemán, quien a comienzos del siglo XX presentó una clasificación de los climas del mundo.

Esta clasificación climática es algebraica, al considerar valores numéricos y proporciones, y también empírica, al considerar umbrales que condicionan la distribución de la vegetación. Así entonces, hace uso de un sistema de letras mayúsculas y minúsculas que denotan rasgos particulares de los climas.

Este sistema se basa en que la vegetación natural tiene una clara relación con el clima, por lo que los límites entre un clima y otro se pueden establecer teniendo en cuenta la distribución de la vegetación. Los parámetros para determinar el clima de una zona son las temperaturas y las precipitaciones medias anuales y mensuales, y la estacionalidad de la precipitación.

Dicha clasificación divide los climas del mundo en cinco grandes grupos principales: tropical, seco, templado, continental y polar. Identificados por una letra mayúscula, cada grupo se divide en





subgrupos, y cada subgrupo en tipos de clima. Los tipos de clima se identifican con un símbolo de 2 o 3 letras. Para el caso de Chile, la clasificación y sus principales características se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Clasificación Köppen para los climas en Chile

Código	Denominación	Precip {mm}	T. media [°C]	Alt. Min. [msnm]	Alt. Max [msnm]
BSk	Clima semiárido	120,0	8,0	800	3000
BSk (s)	Clima semiárido de lluvia invernal	130,0	12,5	50	3100
BSk (s) (i)	Clima semiárido de lluvia invernal e influencia costera	185,0	14,5	0	1000
BSk (w)	Clima semiárido de lluvia estival	65,0	8,5	2500	4000
BWh	Clima desértico cálido	10,0	18,5	150	800
BWh (s)	Clima desértico cálido de lluvia invernal	25,0	18,5	0	600
BWk	Clima desértico frío	10,0	16,0	300	3000
BWk (s)	Clima desértico frío de lluvia invernal	20,0	14,5	100	3000
BWk (w)	Clima desértico frío de lluvia estival	10,0	13,0	1000	3500
Cfb	Clima templado lluvioso	2100,0	9,0	0	1400
Cfb (i)	Clima templado lluvioso e influencia costera	1800,0	10,0	0	1000
Cfb (s)	Clima templado lluvioso con leve sequedad estival	2100,0	9,5	200	2000
Cfb (s) (i)	Clima templado lluvioso con leve sequedad estival e influencia costera	1800,0	10,5	0	1000
Cfc	Clima templado lluvioso frío	1800,0	6,5	50	1600
Cfc (s)	Clima templado lluvioso frío con leve sequedad estival	1800,0	6,5	800	2000
Csb	Clima mediterráneo de lluvia invernal	700,0	11,0	100	1000
Csb (h)	Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura	900,0	9,0	1000	3000
Csb (i)	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera	900,0	12,0	0	750



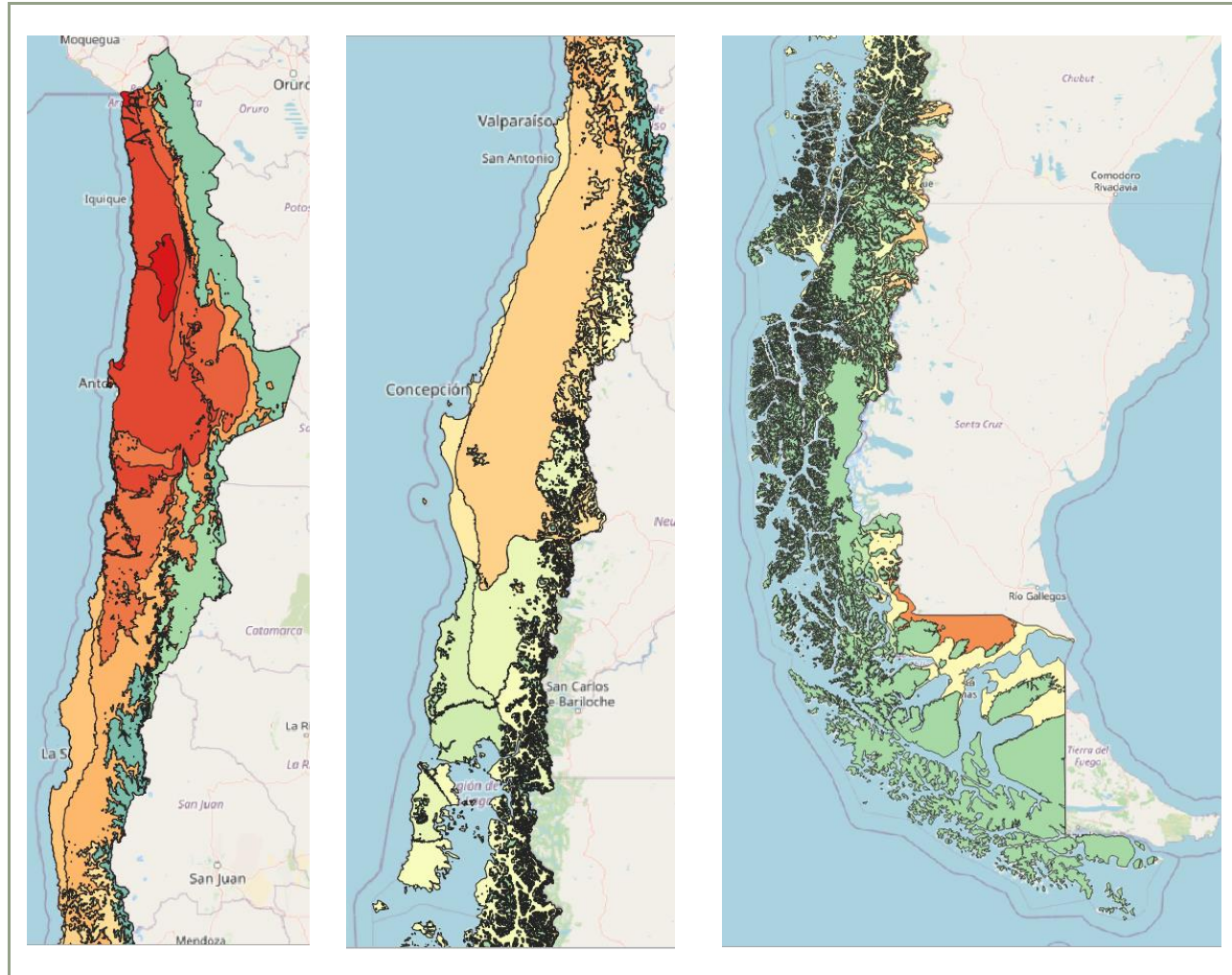
Código	Denominación	Precip {mm}	T. media [°C]	Alt. Min. [msnm]	Alt. Max [msnm]
Csc	Clima mediterráneo frío de lluvia invernal	900,0	6,0	650	2500
EF	Clima glacial	300,0	-5,0	5000	6400
EF (s)	Clima glacial de lluvia invernal	310,0	-5,0	5000	5600
EF (w)	Clima glacial de lluvia estival	200,0	-4,0	6000	6700
ET	Clima de tundra	700,0	4,0	2000	4300
ET (s)	Clima de tundra de lluvia invernal	700,0	3,0	1800	4750
ET (w)	Clima de tundra de lluvia estival	120,0	4,0	3500	6200
ET	Clima de tundra	700,0	4,0	2000	4300
ET	Clima de tundra	700,0	4,0	2000	4300
ET	Clima de tundra	700,0	4,0	2000	4300
ET	Clima de tundra	700,0	4,0	2000	4300

Fuente: Elaboración propia en base a información de la plataforma Itrend

La distribución de esta tipología a lo largo del país se puede observar en la siguiente figura.



Figura 5. Climas presentes en Chile según clasificación Köppen



Fuente: Elaboración propia

La simbología asociada es la que se presenta a continuación.



Figura 6. Simbología empleada para la clasificación climática Köppen

Símbolo	Valor
✓	Clima desértico cálido
✓	Clima desértico cálido de lluvia invernal
✓	Clima desértico frío
✓	Clima desértico frío de lluvia estival
✓	Clima desértico frío de lluvia invernal
✓	Clima semiárido
✓	Clima semiárido de lluvia estival
✓	Clima semiárido de lluvia invernal
✓	Clima semiárido de lluvia invernal e influencia costera
✓	Clima mediterráneo de lluvia invernal
✓	Clima mediterráneo de lluvia invernal de altura
✓	Clima mediterráneo de lluvia invernal e influencia costera
✓	Clima mediterráneo frío de lluvia invernal
✓	Clima templado lluvioso
✓	Clima templado lluvioso con leve sequedad estival
✓	Clima templado lluvioso con leve sequedad estival e influencia costera
✓	Clima templado lluvioso e influencia costera
✓	Clima templado lluvioso frío
✓	Clima templado lluvioso frío con leve sequedad estival
✓	Clima de tundra
✓	Clima de tundra de lluvia estival
✓	Clima de tundra de lluvia invernal
✓	Clima glacial
✓	Clima glacial de lluvia estival
✓	Clima glacial de lluvia invernal
✓	<i>todos los otros valores</i>

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Principales eventos climáticos y fenómenos naturales registrados

Si bien la climatología permite una clasificación y caracterización de elementos relativamente simples de medir, a través de los cuales es posible tener una noción de las características del entorno natural que acompañarán a las actividades desarrolladas en ellos, existen también algunos sucesos particulares, los cuales ocurren con mayor o menor frecuencia en cada país. Estos sucesos son conocidos como eventos o fenómenos naturales y corresponden a cambios que ocurren en la naturaleza y que no son provocados por la acción directa del ser humano. Estos eventos pueden tener impactos positivos, negativos o no influir en las actividades cotidianas. Algunos ejemplos de estos fenómenos naturales incluyen



terremotos, inundaciones, erupciones volcánicas, huracanes y sequías entre otros. Dichos fenómenos pueden causar desastres naturales cuando tienen efectos adversos significativos en las personas, poblaciones, la propiedad o el medio ambiente.

### 3.2.1. Marco conceptual

Desde algunos años, numerosos investigadores e instituciones tanto nacionales como internacionales se han sumado al estudio de estos fenómenos. Este trabajo se ha traducido en la definición de distintos conceptos relativos a los desastres y su gestión, así como también a acuerdos para avanzar en la reducción de los riesgos que ellos pueden implicar.

A continuación, se presentan algunas definiciones respecto de lo que se entiende por ciertos conceptos asociados a la vulnerabilidad y resiliencia del sistema energético ante amenazas climáticas<sup>7</sup>.

- **Evento extremo:** Según la definición del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), relativo a eventos climáticos, un evento climático extremo es “*un evento que es raro en un lugar y época del año en particular. Las definiciones de raro varían, pero un evento meteorológico extremo normalmente sería tan raro o más raro que el percentil 10 o 90 de una función de densidad de probabilidad estimada a partir de observaciones. Por definición, las características de lo que se llama clima extremo pueden variar de un lugar a otro en un sentido absoluto. Cuando un patrón de clima extremo persiste durante algún tiempo, como una temporada, puede ser clasificado como un evento climático extremo, especialmente si produce un promedio o total que es en sí mismo extremo; por ejemplo, sequía o lluvias intensas durante una temporada*” (IPCC, 2014).
- **Riesgo:** Para el sector Energía, el riesgo se refiere al potencial de consecuencias adversas en el suministro y gestión de energía, donde la infraestructura energética y la seguridad pública están en juego bajo condiciones de incertidumbre climática. Este riesgo se cuantifica como la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos, como olas de calor, multiplicada por los impactos en el sistema energético y la sociedad si dichos eventos ocurren, incluyendo la afectación a la eficiencia de los sistemas de almacenamiento de energía y las dificultades en manejar demandas *peak* (Allen, M. *et al*, 2023).
- **Desastre:** El concepto de desastre es definido por las Naciones Unidas como “una interrupción grave del funcionamiento de una comunidad o sociedad a cualquier escala debido a eventos peligrosos que interactúan con las condiciones de exposición, vulnerabilidad y capacidad de

<sup>7</sup> Para una referencia detallada sobre estos temas, se recomienda revisar el informe “*Global Warming of 1.5 °C*” del IPCC <https://www.ipcc.ch/sr15/download/>



respuesta, que provocan uno o más de los siguientes efectos: pérdidas e impactos humanos, materiales, económicos y ambientales” (UNDRR, 2020). Se debe destacar que esta definición señala como criterio para calificar a un evento como desastre, la capacidad local de respuesta: “El efecto puede poner a prueba o exceder la capacidad de una comunidad o sociedad para hacer frente utilizando sus propios recursos y, por lo tanto, puede requerir la asistencia de fuentes externas, que podrían incluir jurisdicciones vecinas, tanto a nivel nacional o internacional” (UNDRR, 2020a).

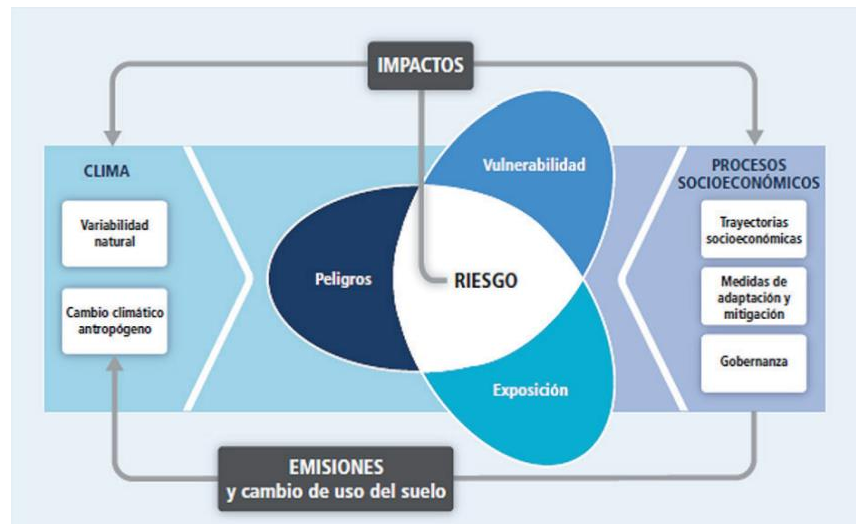
- **Vulnerabilidad:** Condiciones que aumentan la susceptibilidad del sistema energético, incluyendo factores físicos (como infraestructura y tecnología), sociales (como accesibilidad y dependencia de la energía), económicos (como inversión en energías renovables) y ambientales (como impacto del cambio climático), frente a eventos como las olas de calor.
- **Exposición:** Presencia de infraestructura energética, servicios esenciales y recursos económicos en áreas susceptibles a impactos negativos de eventos extremos, particularmente las olas de calor que pueden desencadenar fallos en el suministro de energía.
- **Amenaza (Peligro):** Potencial de eventos climáticos extremos, como olas de calor, que pueden causar interrupciones en el suministro de energía, afectando la vida, la salud, la infraestructura energética y los medios de vida.
- **Resiliencia:** Se refiere al proceso dinámico relacionado con la capacidad del sistema energético, incluyendo su infraestructura, servicios y operaciones, para anticipar, resistir, absorber, adaptar y recuperarse de los impactos de eventos climáticos extremos, como las olas de calor. Esto implica una gestión efectiva y oportuna que asegure la continuidad y eficiencia del suministro de energía, incluso bajo condiciones adversas, garantizando la estabilidad y mejora de sus funciones esenciales (Allen, M. et al, 2023). Cuentan para la evaluación de la resiliencia aspectos como la redundancia, rapidez, robustez y habilidad (Ministerio del Interior, 2020).

El IPCC desarrolló un modelo que da cuenta de la interacción de los factores del riesgo debido al cambio del clima, considerado como amenazas, y su relación con los otros factores de vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales. Los conceptos básicos del modelo vinculan el impacto de los riesgos generados por los cambios en el sistema climático (probabilidad de ocurrencia) y los procesos socioeconómicos (adaptación y mitigación), los cuales en su conjunto e interrelación son impulsores de peligros, exposición y vulnerabilidad. Es importante señalar, de acuerdo al modelo de la interacción de riesgo del IPCC, que los efectos del cambio del clima (natural y antropogénico) contribuyen al aumento de ocurrencia de amenazas (peligros), y, por tanto, al aumento del riesgo en sí a estar propensos a los desastres. En el caso particular de Chile, las amenazas naturales asociadas al cambio de clima son una tipología de amenaza que debe enfrentar el país, así como las amenazas debido de la ubicación y características geográficas de Chile, donde cuenta con una alta actividad sísmica y



volcánica, destacando sus impactos y efectos en la ocurrencia de este tipo de eventos, incluso a nivel mundial. Adicionalmente, existen otras amenazas producto de las actividades antrópicas, como, por ejemplo, mega incendios, emergencias relacionadas con manipulación de sustancias peligrosas, entre otras, las que serán abordadas en este capítulo.

Figura 7. Modelo de interacción del riesgo del IPCC (2014)



Fuente: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014

### 3.2.2. Eventos climáticos

A continuación, se reporta el estado de algunos de los eventos climáticos más significativos y frecuentes que ocurren en el país. Las series han sido extraídas de fuentes de datos abiertas y procesadas geoespacialmente de tal manera de contar con una perspectiva geográfica más clara que permita también una posterior superposición con la infraestructura levantada y reportada anteriormente.

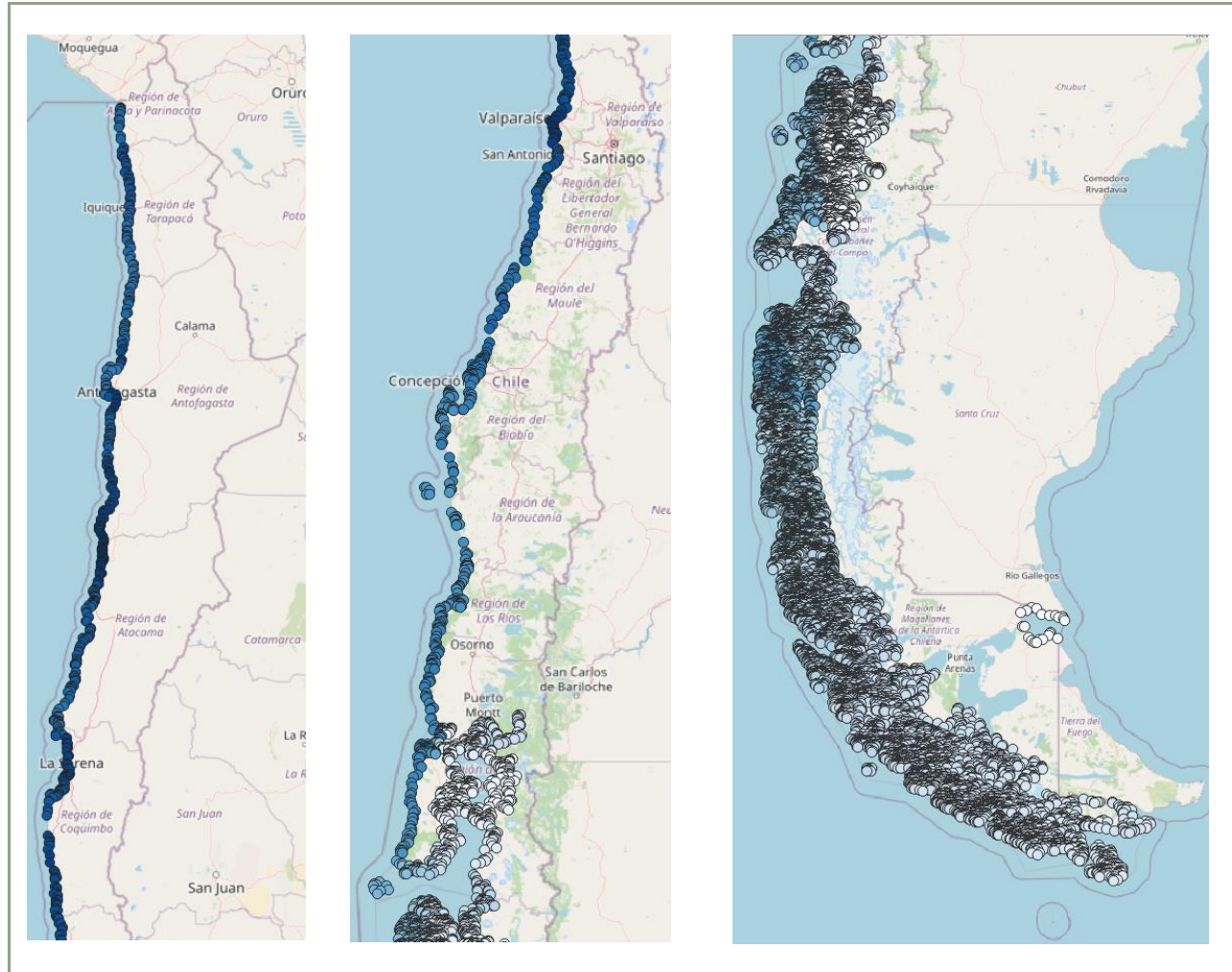
#### 3.2.2.1. Tsunami

La figura mostrada a continuación ilustra información de la altura máxima de inundación (MIH) esperada por un tsunami por sobre el nivel del mar para cada punto geográfico, siendo consistentes con la terminología de la IOC-UNESCO. El MIH es calculado considerando tsunamis provocados por efectos sísmicos para 6 valores de período de retorno diferentes: 10, 50, 100, 500, 1000 y 2500 años. Los datos de entrada para la creación de estos modelos por parte del Global Tsunami Modelo se basan en el análisis de amenazas globales. Si bien es cierto se cuenta con la información mencionada, la figura



refleja sólo el valor de un período de retorno de 100 años. La figura muestra colores más oscuros para valores de MIH mayores.

Figura 8. Altura máxima de inundación esperada por un tsunami



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo observado, las zonas con una más probable afectación serían las zonas costeras de la séptima región hacia el norte. Dada la ubicación de las instalaciones de energía, las más expuestas a sufrir algún tipo de daño serían ciertos tramos de la red de transmisión, particularmente en las zonas de Concepción, Valparaíso, La Serena y Antofagasta. La misma situación se aprecia para el caso de las subestaciones. En cuanto a las generadoras, las termoeléctricas de Concepción, Lebu, Valparaíso, Los





---

Vilos, Huasco, Antofagasta, Mejillones, Tocopilla e Iquique estarían más expuestas a daño. Las centrales eólicas que enfrentan mayor riesgo serían aquellas ubicadas en las zonas costeras de la región del Biobío y región de Coquimbo.

En el caso de los terminales marítimos y los almacenes de combustible, las instalaciones ubicadas en las regiones del Biobío, de Valparaíso, Coquimbo, Atacama y Antofagasta serían las de mayor riesgo.

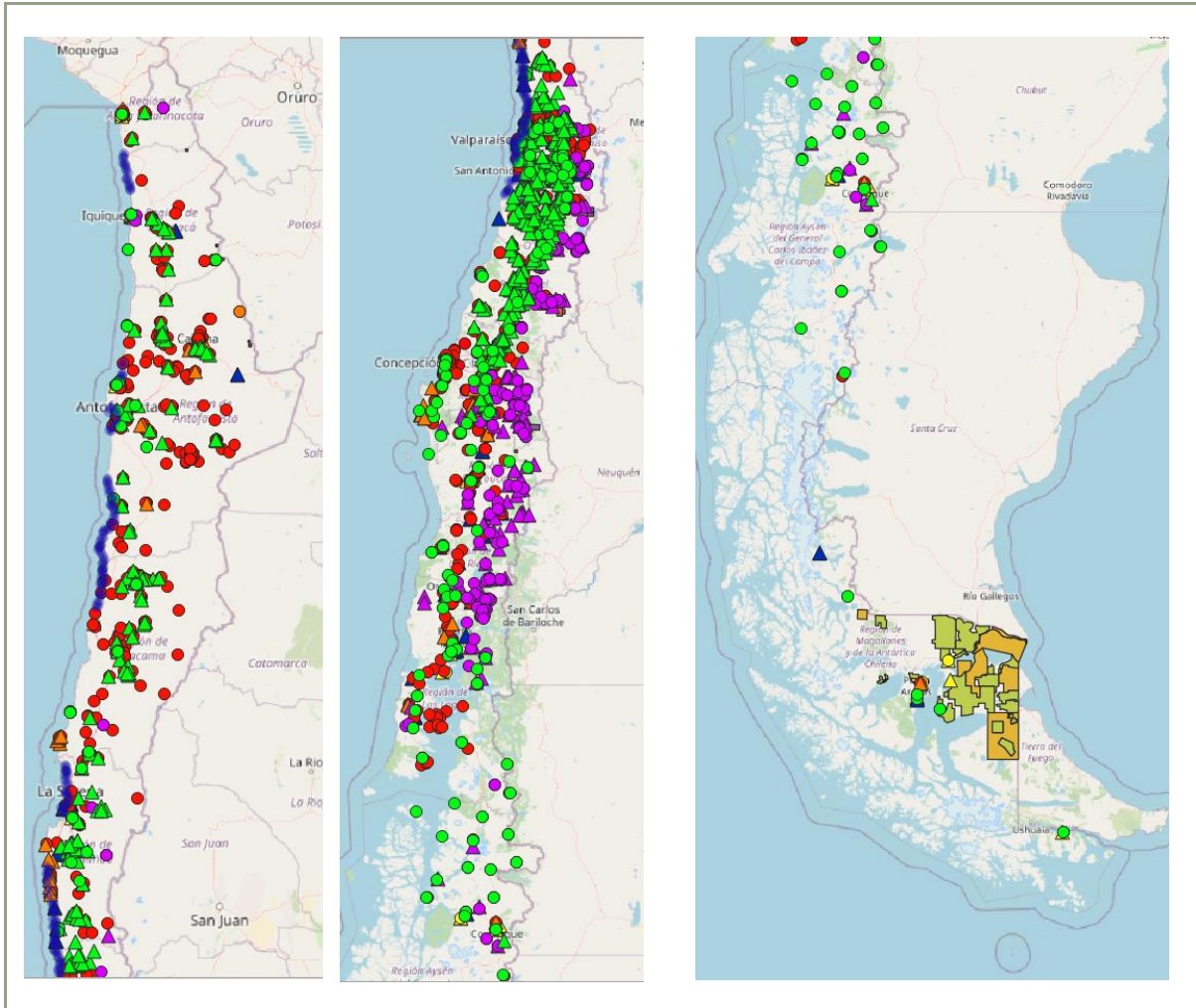
Como ejercicio se ha definido una altura de inundación de 10 m y un radio de 5 kilómetros. Con estos parámetros se determinó el área de influencia de cada evento esperado según la figura anterior y se superpuso con las instalaciones de energía existentes. De esta forma se intenta dar una mirada de las instalaciones que estarían expuestas a las amenazas de tsunami<sup>8</sup>. Los resultados de esta simulación se presentan en las siguientes figuras.

---

<sup>8</sup> Para efectos de la presentación de resultados se ha dividido las instalaciones en aquellas conformadas por ductos y las de capacidad. Esta consideración es válida para todos los análisis de este tipo que se presentan más adelante en el informe



Figura 9. Área de influencia de las inundaciones esperadas por eventos de tsunami – Instalaciones de capacidad

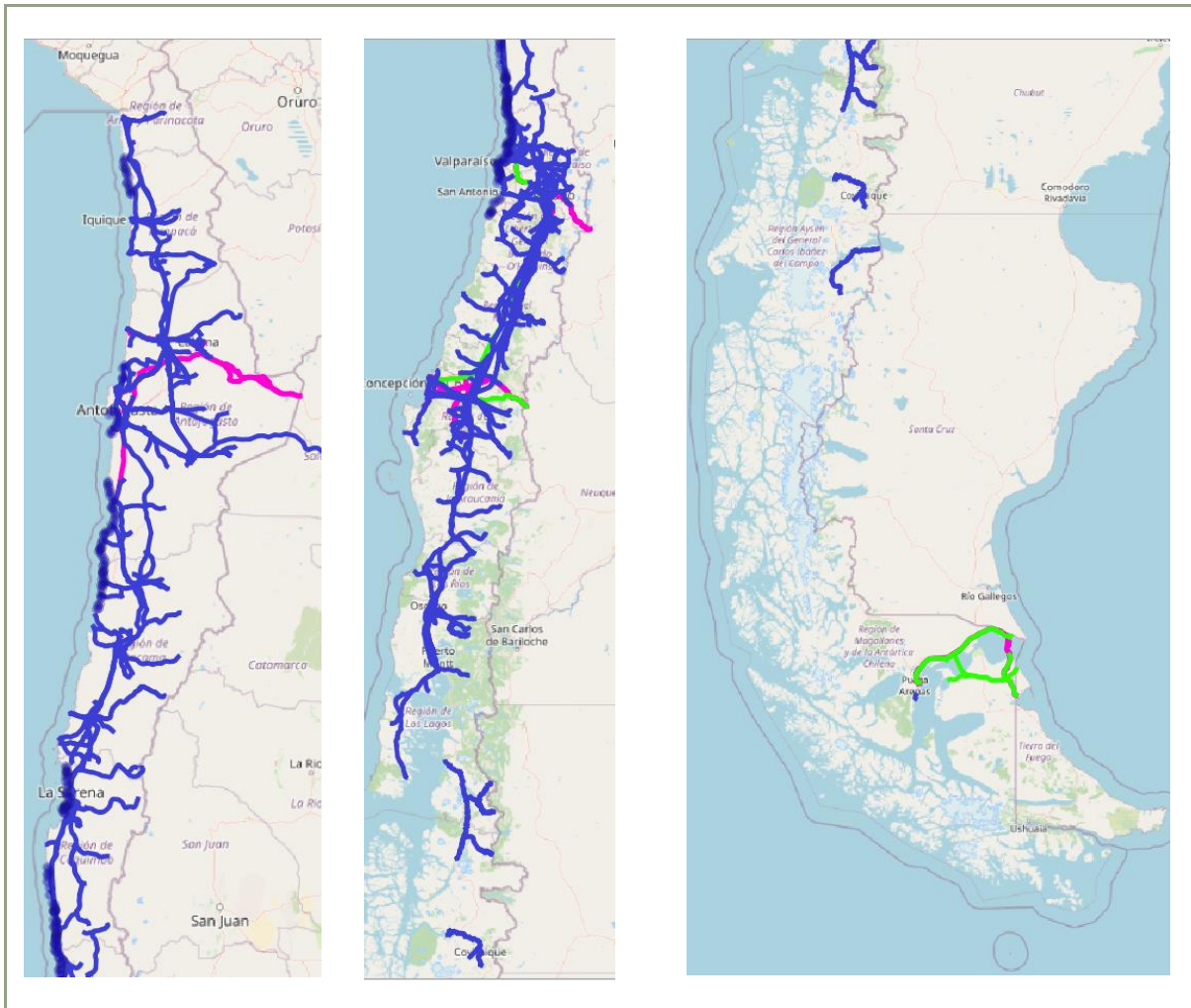


Fuente: Elaboración propia

Las zonas de influencia están identificadas por los círculos de color azul ubicados en el borde costero. La simbología de las instalaciones de energía es la misma empleada inicialmente. A continuación se presenta el análisis para las instalaciones tipo ducto.



Figura 10. Área de influencia de las inundaciones esperadas por eventos de tsunami – Instalaciones tipo ducto



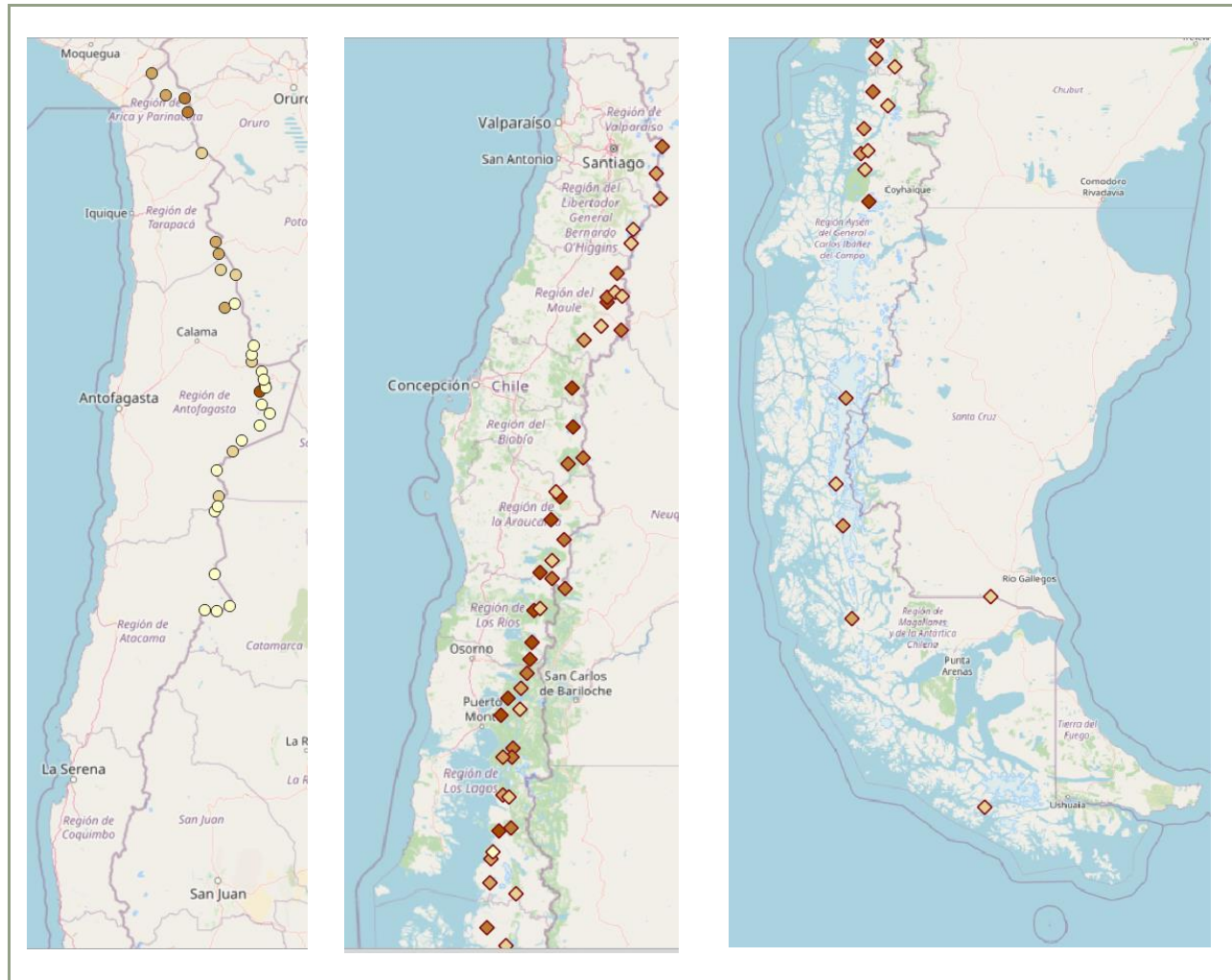
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2.2. Amenaza volcánica

En la figura presentada es posible apreciar en mapa de peligro o amenaza, el cual identifica áreas expuestas al efecto directo e indirecto de posibles erupciones volcánicas, a través de diferentes formas y escalas de representación, que distinguen cada uno de los procesos posibles durante una erupción. Los mayores niveles de peligro son aquellos identificados con colores rojos, mientras que los colores más claros indican una menor amenaza.



Figura 11. Riesgo identificado ante eventos de amenaza volcánica



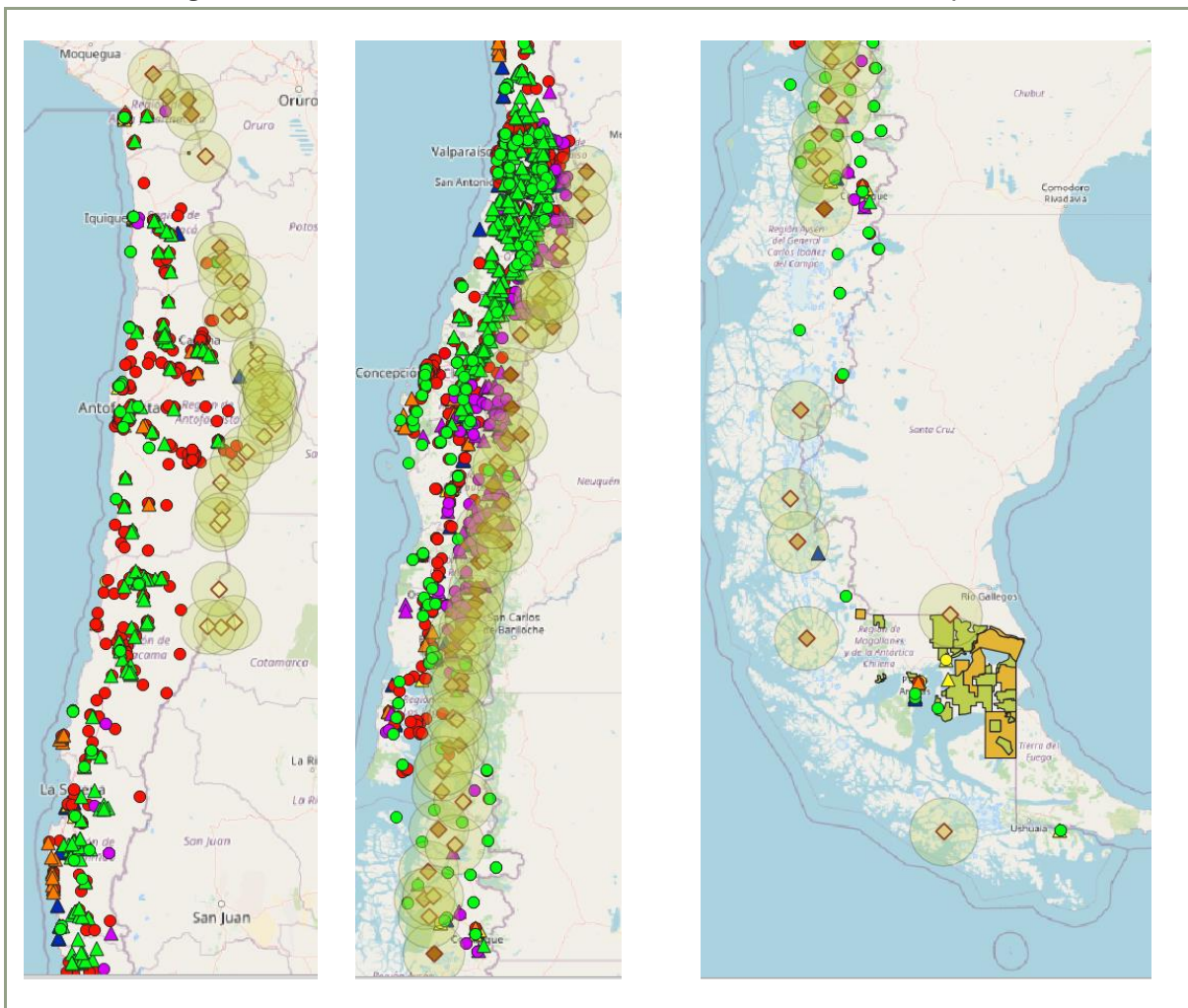
Fuente: Elaboración propia

En contrapartida a lo que ocurre en el caso de los tsunamis, los efectos directos más severos ante amenazas de tipo volcánico se concentran en locaciones más cercanas a los faldeos cordilleranos. Por esa razón es que las instalaciones que enfrentan mayores riesgos son tanto las mini-hidros como las centrales hidroeléctricas. Ocorre algo similar con un par de centrales termoeléctricas de las regiones de la Araucanía y Los Lagos. El caso de las líneas de transmisión es equivalente, con la salvedad de que se deben adicionar algunas líneas de la octava y séptima región que estarían en zona de riesgo mayor.



A continuación, se presenta el ejercicio de determinación de las áreas de influencia de la amenaza volcánica, considerando para ello un radio en torno a cada macizo de 50 kilómetros. En este caso las áreas de influencia se han caracterizado a través de círculos de color verde claro transparentes.

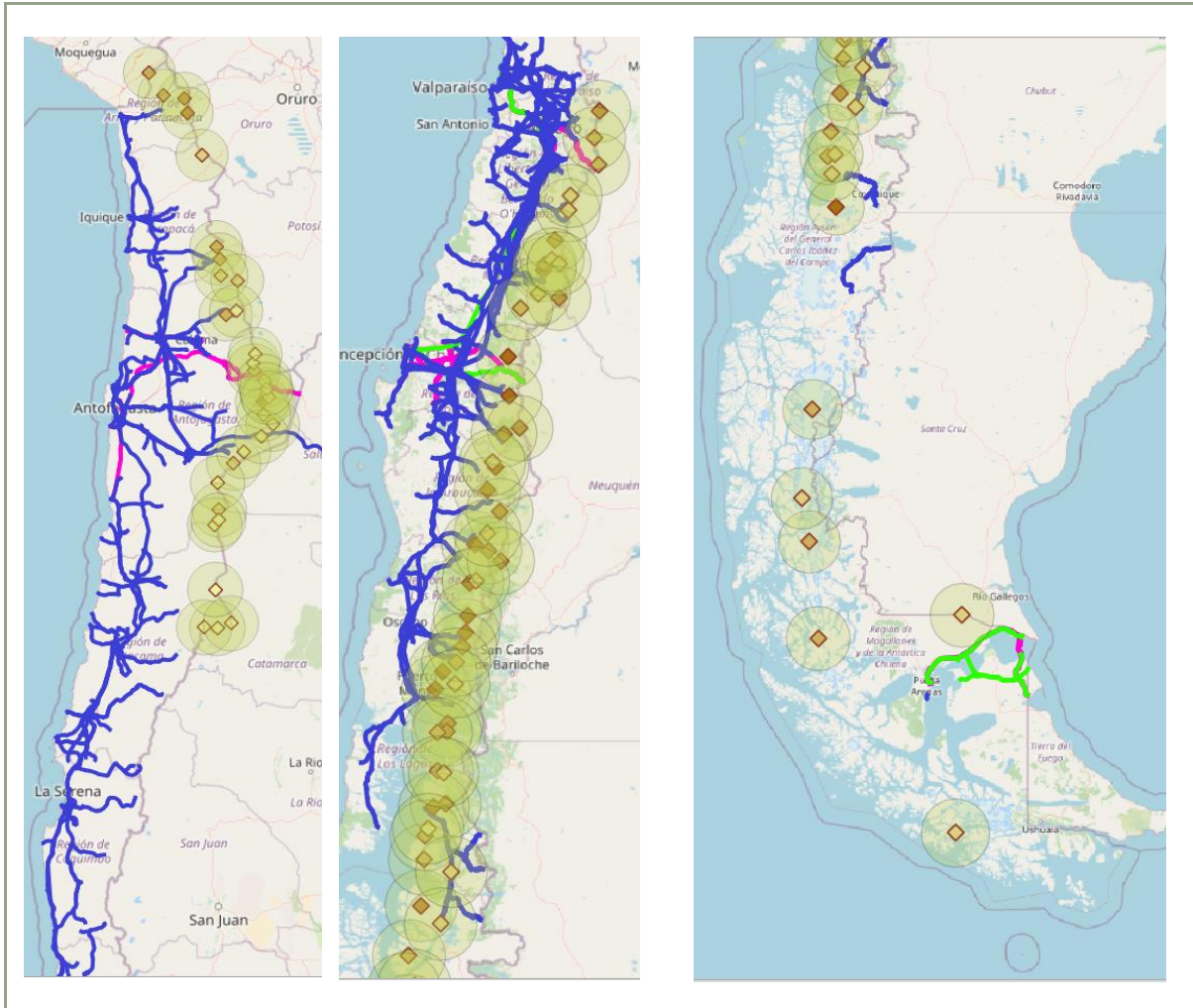
Figura 12. Área de influencia de las amenazas volcánicas – Instalaciones de capacidad



Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Área de influencia de las amenazas volcánicas – Instalaciones tipo ducto



Fuente: Elaboración propia

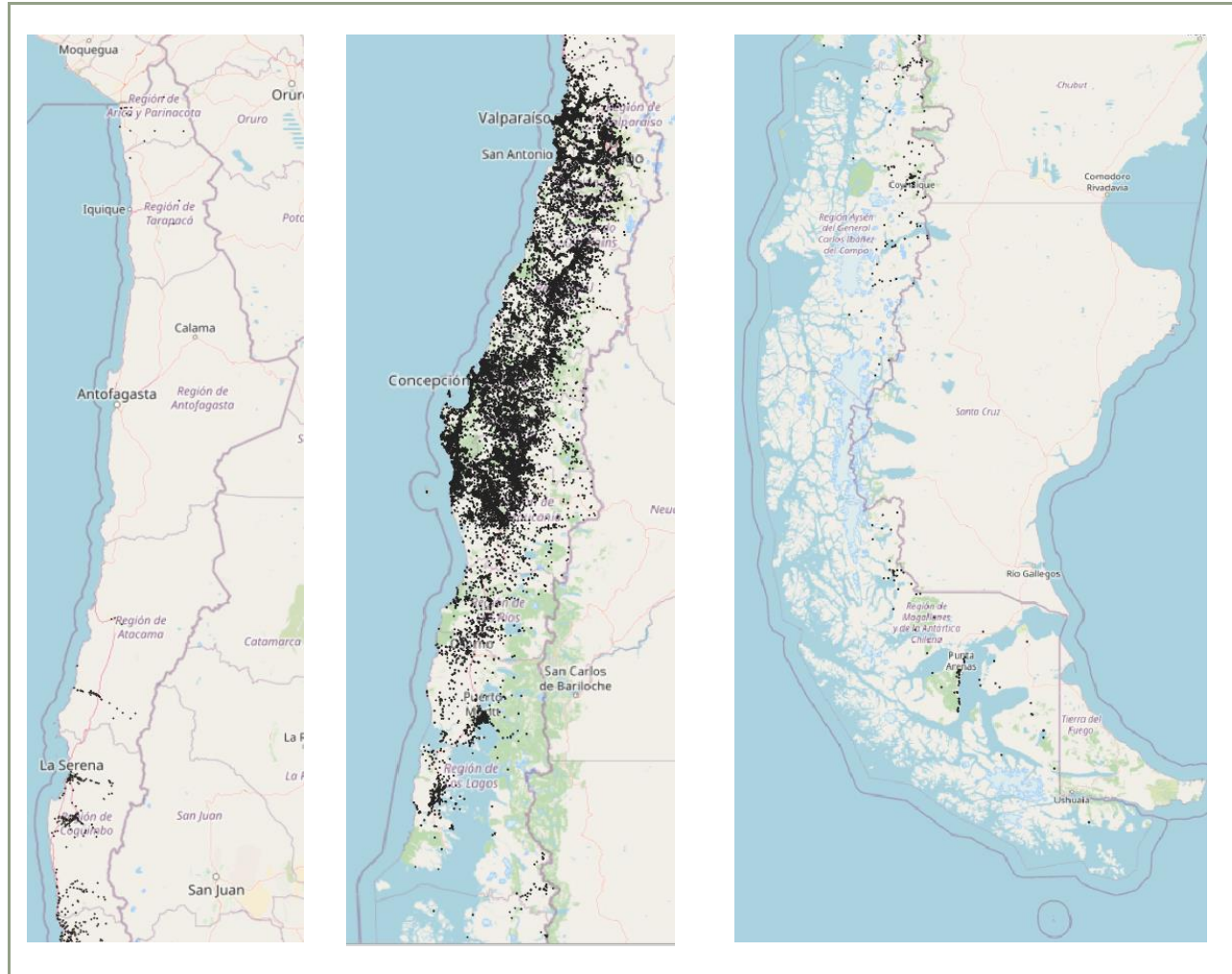
### 3.2.2.3. Incendios forestales

A continuación, se presenta un conjunto de datos a partir del cual fue posible conformar un mapa de amenazas por concepto de incendios forestales, desarrollado a partir de información proveniente de SENAPRED. La peligrosidad se define en base al número de incendios forestales registrados en un área entre las temporadas 2014 – 2015 a 2018 – 2019 de acuerdo a los datos oficiales proporcionados por la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Los niveles de peligrosidad se definen en base al siguiente



criterio: Alto: más de diez (10) incendios acumulados; Medio: Entre cuatro y diez (10) incendios; Bajo: Entre uno (1) y tres (3) incendios acumulados.

Figura 14. Mapa de riesgo de incendios forestales



Fuente: Elaboración propia

De la inspección de los datos anteriores es posible concluir que la mayor proporción de incendios se concentra entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía y si bien un porcentaje alto de dichos eventos ocurre en los valles, este tipo de fenómenos se presenta a lo largo de toda la faja continental de dichas regiones; es decir, abarca tanto zonas costeras como locaciones cordilleranas. Dado lo anterior, es que, debido a esta situación, las redes de transmisión y las centrales de generación ubicadas entre dichas



regiones y las instalaciones de hidrocarburos (para la misma zona geográfica) están en riesgo de verse afectadas. Si existieran tramos de oleoductos y gasoductos que hayan sido construidos bajo tierra, en dichos casos estas instalaciones tendrán menos probabilidad de percibir algún tipo de efecto negativo ante la presencia de este fenómeno.

En el caso de los incendios forestales no es posible presentar el análisis de las zonas de influencia de la ocurrencia de este tipo de eventos sobre la infraestructura energética, ya que por la gran densidad de eventos presentados, se hace ilegible su análisis gráfico. Esta misma razón evita una mejor representación de los eventos, lo que se puede apreciar en las figuras anteriores.

#### *3.2.2.4. Grandes terremotos*

Los fenómenos telúricos son habituales en el país. La figura siguiente identifica la ubicación de los epicentros de los grandes terremotos de los cuales se tiene registro, pero sólo considera aquellos de magnitud igual o superior 7.0. La escala de colores indica que mientras más oscuro es el punto mostrado sobre el mapa, mayor fue su magnitud, hasta alcanzar una magnitud de 9,0.





Figura 15. Mapa de ocurrencia de grandes terremotos



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la estadística de los últimos terremotos de gran magnitud ocurridos en el país, se aprecia que ellos se encuentran distribuidos a lo largo de todo el territorio nacional, hasta la décima región, pero la mayoría concentrada en zonas más bien costeras. Si se pudiera establecer algún grado de concentración geográfico es posible afirmar que las zonas que registran más y mayores eventos telúricos corresponde a las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Coquimbo, Valparaíso, El Maule, Biobío y Los Ríos. Algunos aspectos que deben tenerse presentes cuando se observan las estadísticas de sismos dicen relación con:



- De los fenómenos climatológicos presentes en el país, los sismos y sobre todo aquellos de gran magnitud, son los que presentan zonas de afectación más amplias y por lo tanto es difícil establecer en estos casos áreas de influencia de los eventos en cuestión.
- La habitualidad de estos fenómenos ha obligado a adoptar criterios de diseño que incorporen los efectos adversos de los sismos, por tanto, las normas chilenas de construcción ya consideran las solicitaciones debido a sismo. Este hecho, sumado al buen nivel constructivo presente, en general, en las obras de gran envergadura construidas en Chile, han evitado que los efectos de grandes terremotos sean considerados catastróficos como ocurre en una cantidad importante de países. Este hecho, sin embargo, no aminora el peligro subsecuente que conlleva la ocurrencia de estos eventos.

#### 3.2.2.5. Eventos extremos

En la sección 3.2.1 ya se presentó una definición de evento climático extremo. Se presentan ahora algunas cifras relacionadas con la ocurrencia e identificación de dichos fenómenos y los lugares de mayor afectación de los mismos. El origen de la información que se presenta a continuación proviene de las estadísticas contenidas en los boletines de eventos extremos desarrollados por la Oficina de Servicios Climáticos, dependiente de la Dirección de Meteorología de Chile. Esta publicación tiene una periodicidad anual y la información presentada a continuación resume las estadísticas acumuladas observadas durante los años 2021 y 2020, que a la fecha de elaboración del presente informe corresponden a las estadísticas más actualizadas disponibles.

Tabla 5. Eventos extremos ocurridos en Chile 2020 – 2021

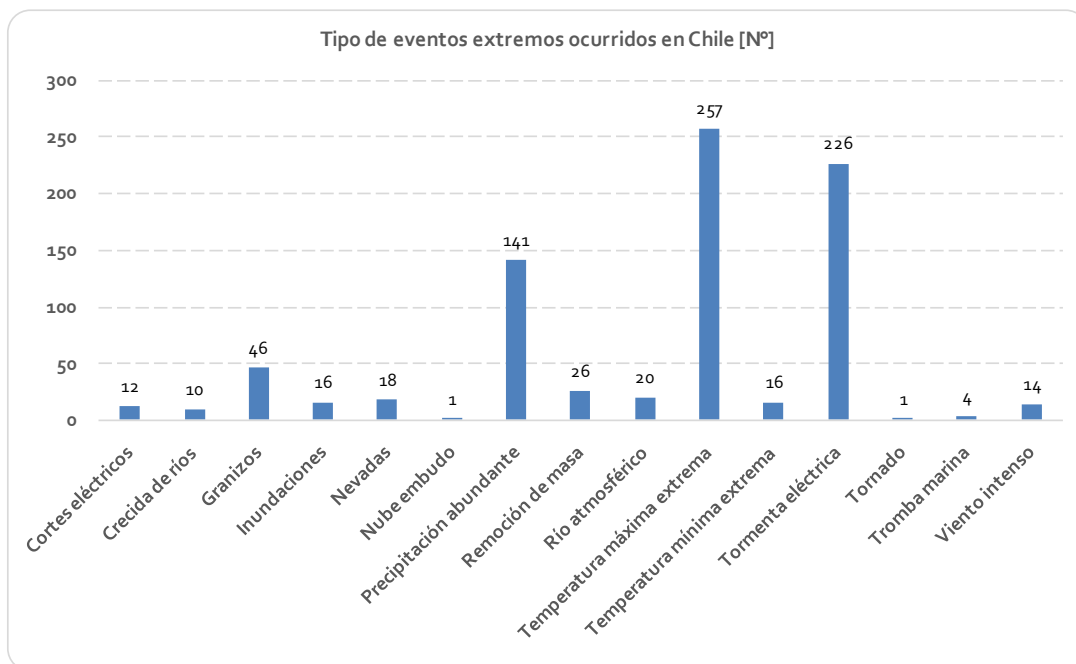
Evento extremo	Cantidad	Porcentaje
Crecida de ríos	10	1,2%
Granizos	46	5,7%
Inundaciones	16	2,0%
Nevadas	18	2,2%
Nube embudo	1	0,1%
Precipitación abundante	141	17,5%
Remoción de masa	26	3,2%
Río atmosférico	20	2,5%
Temperatura máxima extrema	257	31,8%



Evento extremo	Cantidad	Porcentaje
Temperatura mínima extrema	16	2,0%
Tormenta eléctrica	226	28,0%
Tornado	1	0,1%
Tromba marina	4	0,5%
Viento intenso	14	1,7%
<b>Total</b>	<b>808</b>	<b>100,0%</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. Eventos extremos ocurridos en Chile 2020 – 2021



Fuente: Elaboración propia

En los datos anteriores es posible apreciar una clasificación de los eventos climáticos extremos ocurridos durante los años 2020 al 2021 a lo largo del país. De la información presentada se observa que aquellos que ocurrieron con mayor frecuencia fueron aquellos relacionados a las temperaturas máximas extremas, las tormentas eléctricas, los eventos de precipitación abundante y los granizos. Si bien la información permite tanto la clasificación de dichos eventos como la identificación de las zonas



afectadas por los mismos, carece de la precisión geográfica de la data presentada en secciones anteriores. No obstante esta situación, se han podido identificar las principales regiones afectadas en cada evento. De esta forma, si sólo nos concentramos en los cuatro eventos extremos principales, la desagregación de los mismos a nivel de región es la que se presenta a continuación.

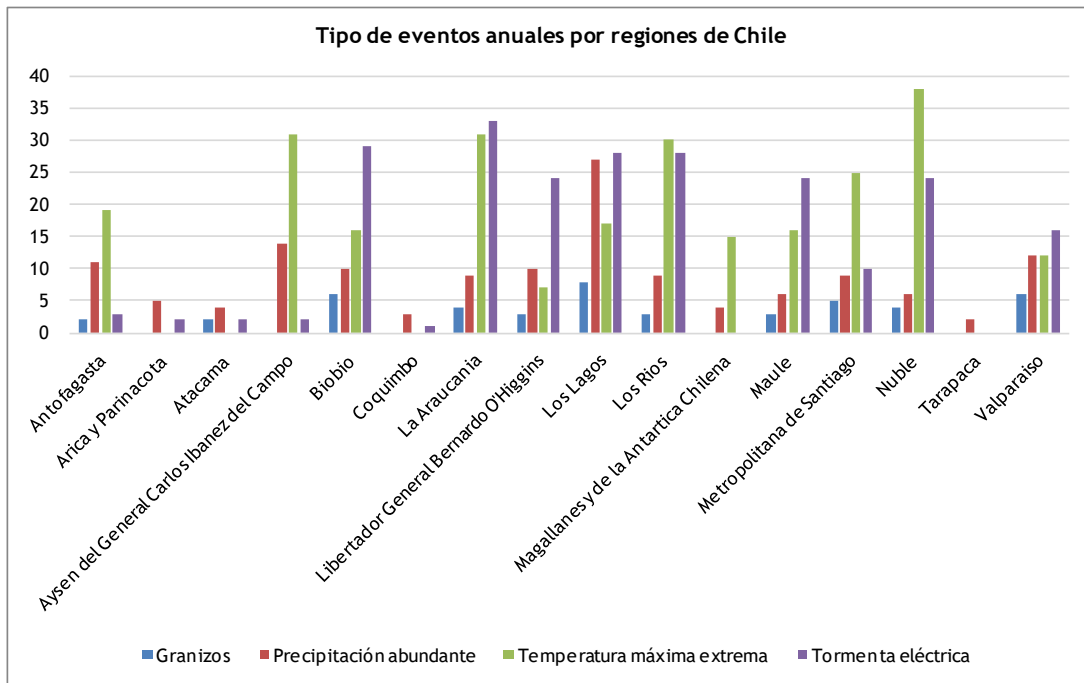
Tabla 6. Regiones afectadas por los eventos climáticos extremos más frecuentes

Región	Granizos	pp abundante	Temp. Máx. extrema	Tormenta eléctrica	Total	Porcentaje
Arica y Parinacota	0	5	0	2	7	1,0%
Tarapacá	0	2	0	0	2	0,3%
Antofagasta	2	11	19	3	35	5,2%
Atacama	2	4	0	2	8	1,2%
Coquimbo	0	3	0	1	4	0,6%
Valparaíso	6	12	12	16	46	6,9%
RM	5	9	25	10	49	7,3%
O'Higgins	3	10	7	24	44	6,6%
Maule	3	6	16	24	49	7,3%
Nuble	4	6	38	24	72	10,7%
Biobío	6	10	16	29	61	9,1%
La Araucanía	4	9	31	33	77	11,5%
Los Ríos	3	9	30	28	70	10,4%
Los Lagos	8	27	17	28	80	11,9%
Aysén	0	14	31	2	47	7,0%
Magallanes	0	4	15	0	19	2,8%
<b>Total</b>	<b>46</b>	<b>141</b>	<b>257</b>	<b>226</b>	<b>670</b>	<b>100,0%</b>

Fuente: Elaboración propia



Gráfico 4. Regiones afectadas por los eventos climáticos extremos más frecuentes.



Fuente: Elaboración propia

La estadística indica que la mayor concentración de eventos extremos se presenta entre las regiones quinta (Valparaíso) hasta la décima (Los Lagos). Por otra parte, las regiones de Arica y Parinacota, Atacama y Coquimbo muestran predominancia en la ocurrencia de eventos de precipitación abundante y tormenta eléctrica, mientras que en Antofagasta se suma la temperatura máxima extrema. El resto del país (quinta región hasta la región de Aysén) presenta predominancia de precipitación abundante, temperatura máxima extrema y tormenta eléctrica, salvo la región de Magallanes en la que no se registran tormentas eléctricas.

### 3.3. Análisis de Causalidad SAIDI y SAIFI

El SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) es un parámetro que muestra, en promedio, el tiempo que un usuario se encuentra sin suministro eléctrico durante un período determinado. Por su parte, el SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) indica la frecuencia con que el cliente experimenta una interrupción sostenida durante un período de tiempo predefinido, y relaciona a los



clientes afectados con el total de clientes, ya sea regional o a nivel país, dependiendo a qué nivel se desea tener cada indicador.

Para determinar la causalidad de las amenazas naturales y exacerbadas producidas por el cambio climático, se realizó un análisis econométrico de datos de panel con efectos aleatorios, basado en series diarias, desde el 1 de enero de 2020 al 31 de octubre de 2023. Así, el panel cuenta con 273.783 registros. Se usaron como variable dependiente los indicadores SAIDI y SAIFI diario país y regional, y como variables explicativas una medida de la temperatura máxima del día a nivel regional, las precipitaciones, la duración de olas de calor y la ocurrencia de sismos.

Específicamente, en el caso del presente estudio se estimaron modelos de datos de panel con efectos aleatorios de la siguiente manera:

$$Y_{i,t} = \beta_1 + \beta_2 s_{i,t} + \beta_3 p_{it} + \beta_4 tmax_{i,t} + \beta_5 ola_t + \beta_5 vto_{i,t} + \varepsilon_{it}$$

En donde:

$Y_{i,t}$  = SAIDI/SAIFI de la región  $i$  en el mes  $t$ .

$s_i$  = variable igual a 1 si la región  $i$  tuvo algún evento sísmico de importancia en el día  $t$ .

$p_{it}$  = precipitaciones caídas en la región  $i$  en el día  $t$ .

$tmax_{it}$  = temperaturas máximas en la región  $i$  en el día  $t$ .

$ola_{it}$  = variable binaria que toma el valor 1 en días  $t$  con ola de calor en la región  $i$ . Se define ola de calor en aquellos casos en que hubo una temperatura máxima de 30° durante tres o más días seguidos.

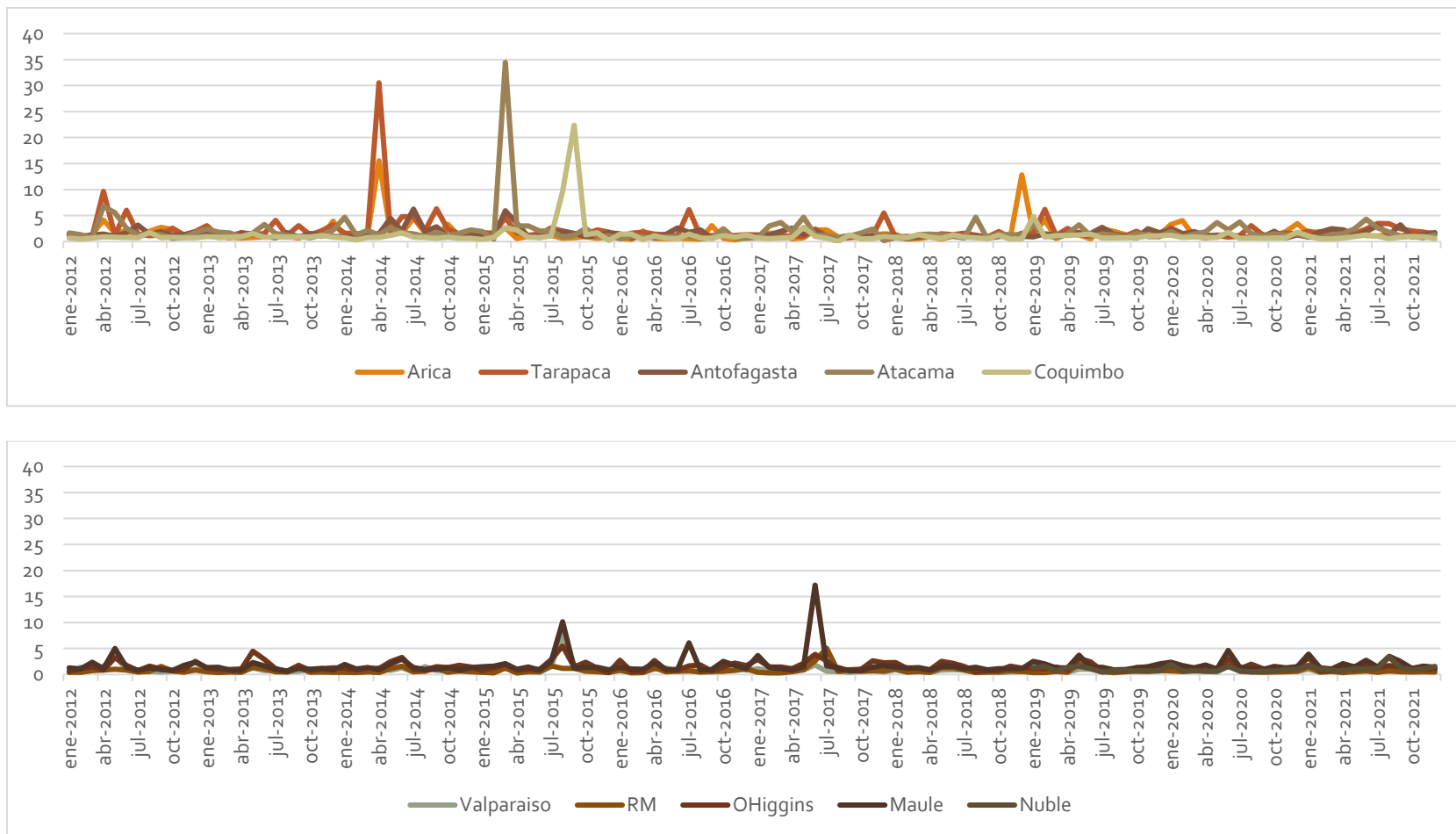
$vto_{it}$  = velocidad del viento máxima en la región  $i$  en el día  $t$ .

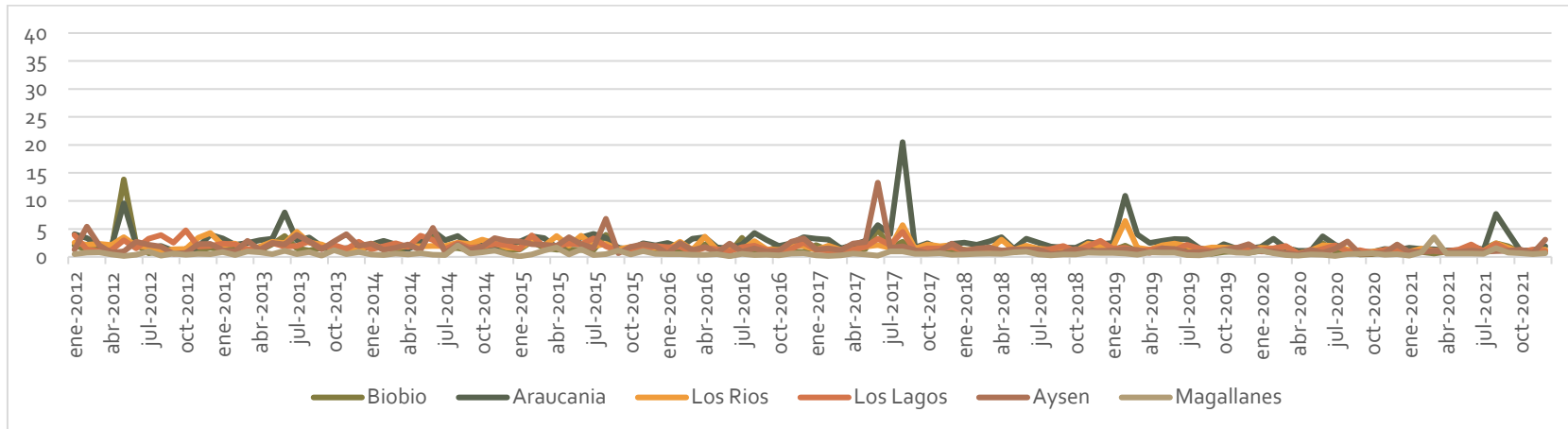
$\varepsilon_{it}$  = término de error aleatorio.

Para analizar la evolución del SAIDI en las regiones de Chile, es importante considerar las tendencias y patrones generales a lo largo de los años. A continuación, se presenta un gráfico con la evolución del indicador para las diferentes regiones, para identificar *peaks* y tendencias.



Gráfico 5. Evolución del SAIDI regional en Chile (2012-2021)





Fuente: SEC





En general, se observa una disminución en el SAIDI en la mayoría de las regiones a lo largo del tiempo. Esto indica una mejora en la calidad del suministro eléctrico en todo el país. Sin embargo, en algunos meses y regiones, se producen aumentos significativos del SAIDI, lo que puede estar relacionado con eventos climáticos extremos, fallas en la infraestructura eléctrica o problemas operativos.

- Variabilidad Estacional: En general, se observa una variabilidad estacional en todas las regiones, con *peaks* de SAIDI durante los meses de invierno y valores más bajos durante los meses de verano. Esto es típico en muchas regiones debido a las condiciones climáticas y al aumento de la demanda eléctrica durante el invierno.
- Variabilidad Regional: Hay diferencias significativas en los niveles de SAIDI entre las regiones. Algunas regiones como Valparaíso, la Metropolitana y Magallanes, tienden a tener valores más bajos de SAIDI, mientras que otras, como La Araucanía y Tarapacá, tienden a tener valores más altos.
- Aumento de SAIDI en Algunas Regiones: Se observa un aumento en el SAIDI en varias regiones durante los años 2014 y 2015. Esto podría estar relacionado con eventos extremos, como se detallará más adelante.

La elección de un modelo de datos de panel con variables aleatorias se debe a su capacidad para controlar los efectos individuales de las regiones estudiadas y, al mismo tiempo, permitir la evaluación de las relaciones a lo largo del tiempo. Esto es esencial para comprender cómo las condiciones regionales afectan la duración media de las interrupciones en el servicio eléctrico en el tiempo.

Los resultados del análisis revelaron que no siempre las cinco variables estudiadas mostraron ser significativas en la regresión, por lo que los modelos consideran solo las variables que lograron ser significativas en el modelo.



Tabla 7. Análisis de causalidad del SAIDI país

```
. xtreg saidi_pais pp vmax

Random-effects GLS regression           Number of obs   =    22,400
Group variable: region                 Number of groups =     16

R-sq:                                  Obs per group:
    within = 0.0712                    min =         1,400
    between = 0.2035                   avg =        1,400.0
    overall = 0.0404                   max =         1,400

corr(u_i, X) = 0 (assumed)             Wald chi2(2)    =    1708.84
                                         Prob > chi2     =     0.0000
```

saidi_pais	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
pp	.0003109	8.39e-06	37.05	0.000	.0002944	.0003273
vmax	.0001094	.0000103	10.65	0.000	.0000892	.0001295
_cons	.0005003	.0004648	1.08	0.282	-.0004107	.0014112
sigma_u	.00178012					
sigma_e	.00575631					
rho	.08728575	(fraction of variance due to u_i)				

Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede apreciar en los resultados de la regresión, los coeficientes encontrados para las variables fueron los siguientes:

- Coeficiente de Precipitaciones (pp) igual a 0.0003109. Un aumento en las precipitaciones se relaciona con un incremento en el SAIDI. Por cada unidad adicional en precipitaciones, el SAIDI aumenta en promedio 0.0003109 unidades.
- Coeficiente de velocidad máxima del viento (vmax) igual a 0.0001094. Un aumento en la velocidad del viento se asocia con un incremento en el SAIDI. Por cada unidad adicional, el SAIDI aumenta en 0.0001094 unidades.

Todas las variables incluidas en el modelo son estadísticamente significativas, ya que sus p-valores son menores a 0.05. Las variables que no se consideraron en el modelo por no ser significativas no se mencionan en este resumen.



Tabla 8. Análisis de causalidad del SAIDI región

```
. xtreg saidi_region pp vmax
```

Random-effects GLS regression  
Group variable: region

Number of obs = 22,400  
Number of groups = 16

R-sq:  
within = 0.0752  
between = 0.0488  
overall = 0.0601

Obs per group:  
min = 1,400  
avg = 1,400.0  
max = 1,400

corr(u\_i, X) = 0 (assumed)

Wald chi2(2) = 1800.08  
Prob > chi2 = 0.0000

saidi_region	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
pp	.0057616	.0001631	35.32	0.000	.0054419	.0060814
vmax	.0032079	.0001965	16.32	0.000	.0028227	.003593
_cons	.0027112	.0042954	0.63	0.528	-.0057075	.01113
sigma_u	.01378389					
sigma_e	.11220574					
rho	.0148665	(fraction of variance due to u_i)				

Fuente: Elaboración propia

Los coeficientes encontrados para las variables fueron los siguientes:

- Coeficiente de Precipitaciones (pp) igual a 0.0057616. Esto indica que un aumento en las precipitaciones está asociado con un incremento en el SAIDI. Por cada unidad adicional de precipitación, el SAIDI aumenta en promedio 0.0057616 unidades.
- Coeficiente de Velocidad Máxima del Viento (vmax) igual a 0.0032079. Esto sugiere que un aumento en la velocidad máxima del viento se asocia con un aumento en el SAIDI. Por cada unidad adicional en la velocidad del viento, el SAIDI aumenta en promedio 0.0032079 unidades.

Ambas variables, pp y vmax, son estadísticamente significativas, ya que sus valores p son menores a 0.05 (indicado por P>|z|).

Por su parte, para el SAIFI se obtuvieron los siguientes resultados:







“Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático”

*Informe Final*

---

Las variables excluidas del modelo por no ser significativas no se mencionan en este resumen.



---

## 4. CASOS DE ESTUDIO INTERNACIONALES: REVISIÓN DE PROTOCOLOS Y REGULACIONES INTERNACIONALES

---

### 4.1. Exploración de regulaciones y protocolos internacionales que definen índices de vulnerabilidad y resiliencia en infraestructura energética.

#### 4.1.1. Revisión general

Se presenta a continuación una revisión de casos respecto a cómo los países enfrentan el problema de la resiliencia en sus sistemas energéticos. Como se verá en detalle más adelante, la gran mayoría de los países desarrollados ha enfrentado una caída en su consumo energético, producto de la evolución de sus economías hacia el sector terciario y a la introducción de medidas de eficiencia energética en diversos ámbitos. De esta forma, se suele percibir que existen ciertas redundancias que permiten mayor resiliencia, especialmente en los casos de generación y distribución.

Por otra parte, el desafío que se menciona con mayor frecuencia es aquel relacionado con la transición hacia la carbono - neutralidad, lo que obligará a una transformación de la estructura de los sistemas energéticos. También se observa que, en el caso de aumento

##### 4.1.1.1. Japón

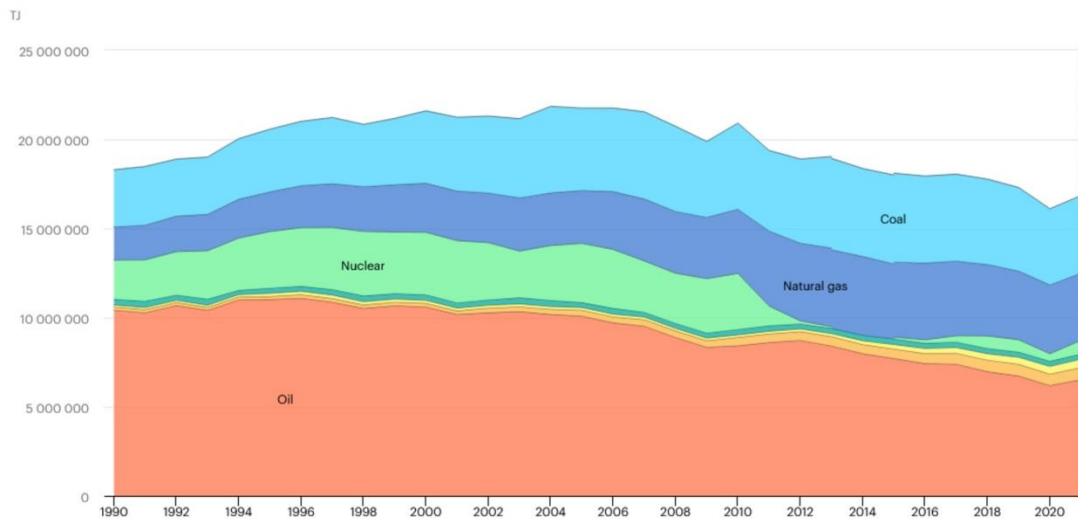
Japón es un país insular (esto es, sin interconexiones eléctricas con otros países) que, por razones históricas, se desarrolló en torno a 10 empresas de provisión de energía eléctrica. Cada una de ellas estaba asociada a una zona geográfica diferente, y originalmente con integración vertical desde la generación hasta la distribución. Hacia la zona este, la provisión de energía en todas las empresas se realiza en 50 Hz, mientras que hacia el oeste la provisión se realiza en 60 Hz. Las distintas empresas tienen sus redes interconectadas entre sí, incluyendo una interconexión entre las zonas de 50 Hz y de 60 Hz, para lo que se utilizan convertidores de frecuencia.

Hasta la década de 1970, una de las principales fuentes de energía para la generación eléctrica era el petróleo. Luego de la crisis de esa década, el país decidió reducir la dependencia de esta fuente y migrar hacia otras fuentes, que incluyen el carbón, el gas y la energía nuclear, como se refleja en la figura siguiente. Muchas unidades generadoras alimentadas a petróleo quedaron fuera de servicio sin ser desmanteladas, es decir, en condición de reserva.



Con el estancamiento de la economía japonesa que se produjo desde la década de 1990 y la caída en la población, el consumo de energía (y de electricidad) ha mostrado una caída desde la primera década del presente siglo, como se muestra en la figura siguiente.

Figura 16. Consumo de energía primaria en Japón. Sobre el petróleo, la franja de color naranja representa los biocombustibles y basura, el amarillo las ERNC y el verde oscuro la generación hidráulica



Fuente: Agencia Internacional de Energía (AIE).

Japón fue afectado por un terremoto de magnitud 9,0 Mw el día 11 de marzo de 2011, con un epicentro frente a las costas de la prefectura de Miyagi, el que fue seguido de un potente maremoto que afectó a la costa del Pacífico de buena parte de la región de Tohoku.

Dentro de los efectos de este maremoto, el más famoso fue el accidente en la central nuclear Fukushima Daiichi, que alcanzó el grado 7 (el más alto) en la escala de accidentes nucleares. Sin embargo, este evento finalmente afectó a buena parte de las centrales termoeléctricas ubicadas en esa costa, las que incluyen unidades nucleares y de combustión, las que dependían del océano para su enfriamiento.

El manejo inmediato de esta caída en la capacidad de generación fue manejado con el reinicio de las antiguas unidades a petróleo, más un uso intensivo de las interconexiones entre zonas. Con el transcurso de los meses, varias centrales a combustión pudieron retornar a sus operaciones, lo que permitió al gobierno japonés la revocación de las licencias operacionales a varias de las centrales





---

nucleares que en ese momento se encontraban en operación, partiendo por aquellas más antiguas y que se consideraban más inseguras, por un aumento en las exigencias de seguridad.

La iniciativa del gobierno implicó la clausura definitiva de las unidades más antiguas, y a la introducción de mejoras en la seguridad de unidades de construcción más reciente (lo que obligó a su cierre y posteriormente su recertificación). El cierre de las unidades nucleares se realizó en forma gradual, comenzando por aquellas que presentaban el mayor número de inconvenientes. Las últimas unidades en desconectarse de la red lo hicieron en 2013 (año en que entró en vigencia una nueva normativa de seguridad), y recién durante 2015 comenzaron a reingresar unidades mejoradas. De esta forma, hubo un período de alrededor de dos años en los que Japón no tuvo generación nuclear. En la actualidad, 10 unidades han obtenido su permiso de reiniciar operaciones (World Nuclear Association<sup>9</sup>).

Una medida posterior a los eventos del terremoto que se orienta a aumentar la resiliencia ha sido el aumento de las capacidades de interconexión entre las distintas empresas, incluyendo un aumento en la potencia de la interconexión entre las redes de 50 Hz y 60 Hz. Con el inicio de la guerra en Ucrania, el gobierno japonés ha realizado gestiones para facilitar el reinicio de los demás reactores, y de esta manera aumentar la autonomía del país.

En 2021, Japón presentó su sexto Plan Estratégico de Energía, el que fija metas especialmente para 2030 que consideran un aumento en la resiliencia y la autonomía del país en materia energética, así como una reducción en las emisiones de carbono. Este plan es una actualización del quinto plan presentado en 2018, y considera metas más estrictas que el anterior.

Respecto a los combustibles, Japón es básicamente un país importador de combustibles fósiles, con una escasa producción interna de petróleo y gas natural, que en ambos casos no alcanza al 10% de la demanda interna. En el caso del carbón, la producción comercial es mínima, de manera que casi todo el combustible llega desde el extranjero.

El petróleo ingresa al país a través de terminales marítimos, y se distribuye por vías de transporte convencionales (marítimo, ferroviario y carretero). No hay oleoductos en el país. El gas natural también ingresa mediante terminales marítimos (como GNL) y se distribuye por gasoductos locales, los que tienen interconexiones limitadas.

---

<sup>9</sup> <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>



Con respecto a la resiliencia, Japón tiene una reserva de petróleo de 90 días<sup>10</sup> de importaciones manejada por la *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation* (JOGMEC), mientras que la industria (importadores, refinadores) deben manejar otros 70 días. Además, disponen de tratados de suministro prioritario con Arabia Saudita y Kuwait. En el caso del gas natural, se maneja principalmente contratos de largo plazo que otorgan flexibilidad para aumentar los volúmenes en el caso de una emergencia. Las reservas en el país equivalen a unos 36 días<sup>11</sup>.

#### 4.1.1.2. California

California forma parte de los Estados Unidos de América, y buena parte de su política energética está vinculada a las políticas nacionales. La provisión de combustibles depende en buena medida de las políticas nacionales, y en este sentido, los EUA cuentan con la Reserva Estratégica de Petróleo (SPR) en sectores del Golfo de México, las que cuentan con una capacidad de 714 millones de barriles, la que es administrada desde el Departamento de Energía (DoE). Adicionalmente, el país cuenta con reservas de 1 millón de barriles de gasolina y 1 millón de barriles de combustible de calefacción.

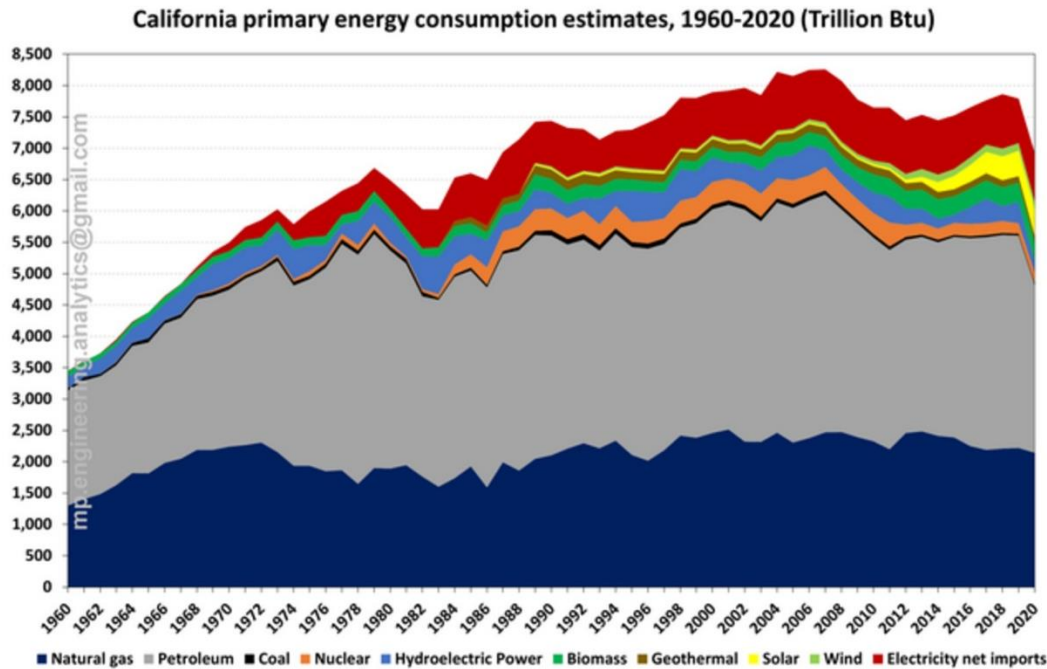
El consumo de energía primaria en California es el que se muestra en la figura siguiente. Se observa la preponderancia del petróleo y el gas natural, así como el hecho de que la demanda no muestra un crecimiento desde 2005.

<sup>10</sup> Se debe notar que 90 días es el mínimo que exige la Agencia Internacional de Energía (AIE) a sus países miembros.

<sup>11</sup> <https://www.iea.org/articles/japan-natural-gas-security-policy>



Gráfico 6. Consumo de energía primaria en California



Fuente: Putzulu, M. (2023)<sup>12</sup>

En lo referente a la provisión de electricidad, el Estado de California forma parte de la Interconexión Oeste, la que abarca varios estados del oeste del país, así como el oeste de Canadá. Por esto, su capacidad de generación (y en cierta medida su transmisión) está en cierta medida respaldada por las capacidades de otros estados, especialmente los aledaños. Además, existen conexiones de corriente continua de esta red con la Interconexión Este del país. Estas conexiones son importantes porque California importa una parte importante de la electricidad que consume (como se observa en la figura anterior), especialmente en horas donde la generación renovable disminuye.

California ha sufrido los efectos del cambio climático ocasionando períodos de escasez energética en los últimos años. Estos períodos se explican en buena medida por los efectos hidrológicos, y por el daño a la infraestructura de transmisión y distribución (Dale, L. et al., 2019), así como la reducción en la capacidad de la generación solar que proviene del aumento en los incendios forestales (Juliano, T. W et al., 2022). Para ello, California por una parte efectúa proyecciones de demanda y análisis de capacidad,

<sup>12</sup> <https://www.linkedin.com/pulse/electric-production-consumption-california-between-matteo-putzulu/>

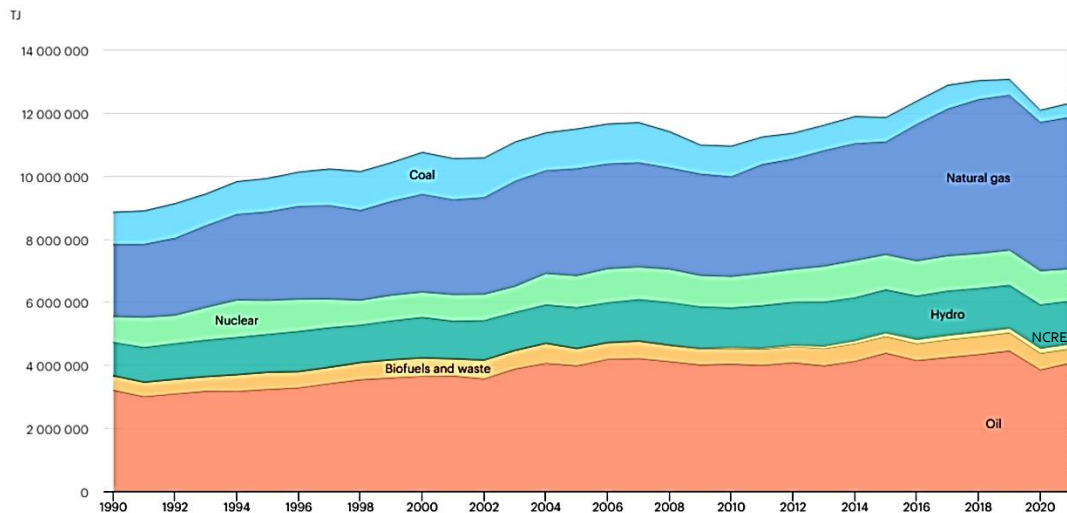


de manera de ayudar en la planificación de la evolución de la capacidad de generación de electricidad en el Estado. Por otra parte, se dictó la Ley 205 de 2022 creó la Reserva Estratégica de Fiabilidad (SRR), que genera mecanismos que facilitan el manejo de crisis de capacidad.

#### 4.1.1.3. Canadá

Canadá es un país con abundantes recursos energéticos, tanto fósiles como renovables. Sus redes eléctricas se encuentran interconectadas con las de Estados Unidos, de manera que su política energética tiene algunos puntos de convergencia. Canadá es un país exportador de combustibles fósiles y de energía en general, que tiene un alto grado de autosuficiencia. La figura muestra la evolución de las fuentes de energía primaria en el país desde 1990.

Gráfico 7. Consumo de energía primaria en Canadá.



Fuente: AIE.

En lo referente al sistema eléctrico, Canadá cuenta con abundante capacidad de generación, de manera que no enfrenta riesgos en el futuro próximo (IEA, 2022). En la interconexión, Canadá es un exportador neto de energía hacia los Estados Unidos, y la creciente penetración de las renovables parece aumentar esta holgura. En 2016 Canadá y Estados Unidos firmaron un tratado (*Joint United States-Canada Electric*



---

*Grid Security And Resilience Strategy*<sup>13)</sup> en el que ambas partes se comprometen a tomar acciones para mejorar la resiliencia de sus sistemas eléctricos.

El cumplimiento de los compromisos del acuerdo comprende una serie de planes de acción que han sido implementados por Canadá<sup>14</sup>. En ese documento se puede ver que su cumplimiento contiene acciones concretas más que indicadores medibles.

En lo referente a petróleo, Canadá es un país exportador miembro de la AIE, de manera que no está obligado a mantener reservas como lo hacen aquellos que importan. La abundancia de este combustible y la fuerte institucionalidad del país hacen que el suministro sea considerado seguro y no se estén contemplados mayores riesgos de momento (IEA, 2022).

#### 4.1.1.4. Nueva Zelanda

Nueva Zelanda es un país insular, sin interconexiones eléctricas, que tiene una gran capacidad instalada y un gran potencial en la energía renovable. Su consumo de energía muestra una tendencia creciente, aunque ha tenido un comportamiento más plano en los últimos 10 años, como se observa en la figura siguiente.

---

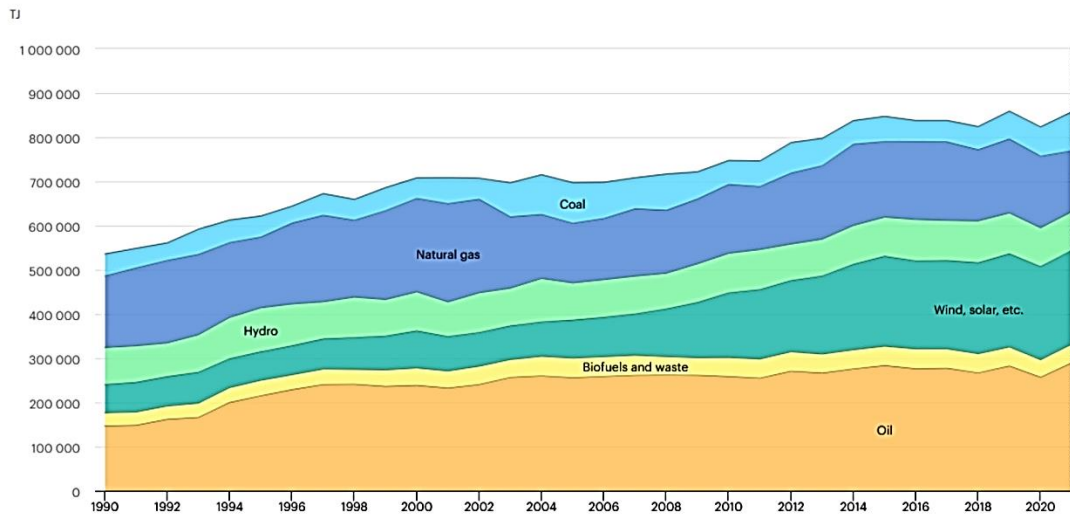
<sup>13</sup> Declaración disponible en:

[https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Joint\\_US\\_Canada\\_Grid\\_Strategy\\_o6Dec2016.pdf](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Joint_US_Canada_Grid_Strategy_o6Dec2016.pdf)

<sup>14</sup> Gobierno de Canadá. NATIONAL ELECTRIC GRID SECURITY AND RESILIENCE ACTION PLAN (2016). Disponible en: [https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/Canadian%20Action%20Plan\\_EN.PDF](https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/Canadian%20Action%20Plan_EN.PDF)



Gráfico 8. Consumo de energía primaria en Nueva Zelanda



Fuente: AIE.

Se puede ver también que el aumento en la generación renovable (de ERNC) ha permitido reducir el consumo de combustibles fósiles, especialmente del gas natural. La generación hidráulica se ha mantenido bastante pareja en el tiempo.

Se trata además de un país que ha recibido embates de terremotos, el más reciente de ellos el de Canterbury en 2010 (7,1 en escala Mw), el que tuvo una réplica de gran magnitud en febrero de 2011. En este último terremoto, las afectaciones a la infraestructura eléctrica se concentraron principalmente en la distribución, con daño en subestaciones, transformadores y postación local. Las medidas de construcción y de gestión permitieron una rápida recuperación de la infraestructura y del suministro en muchas de las zonas afectadas (Watson, N., 2010) (Massie, A. & Watson, N., 2011). Entre estas medidas se cuenta la gestión de recursos de reparación y el restablecimiento provisorio del suministro utilizando grupos electrógenos cuya potencia (en kVA) fuese similar a la de transformadores que estuviesen fuera de servicio.

En la actualidad este país se encuentra elaborando una nueva política energética, la que contempla tanto la resiliencia como la transición hacia fuentes renovables y la carbono neutralidad para 2050. Esta



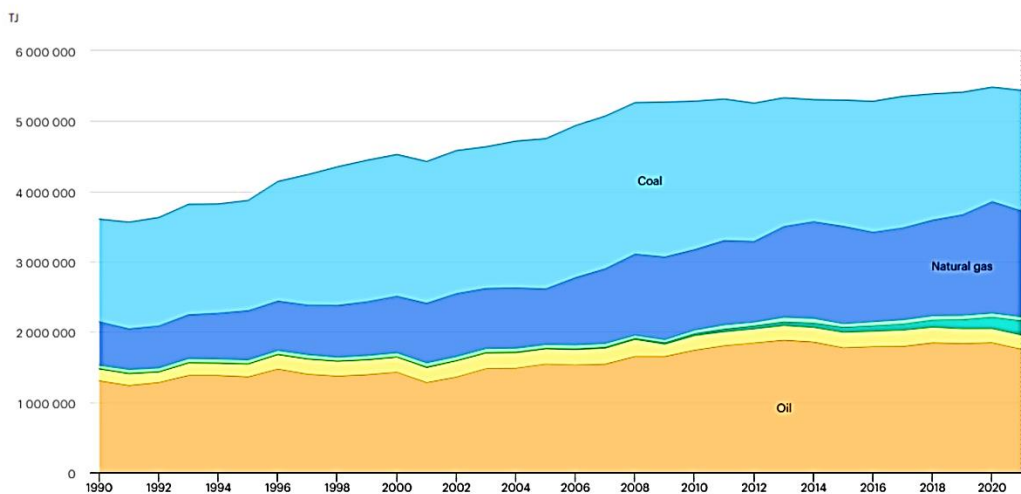
nueva política debería encontrarse actualmente (septiembre de 2023) pronta a iniciar su proceso de consulta pública luego de la primera fase de desarrollo<sup>15</sup>.

#### 4.1.1.5. Australia

Australia es un país insular que cuenta con abundantes recursos de carbón y gas natural, de manera que es uno de los grandes exportadores de ellos en el mundo. Ambos combustibles son muy relevantes en el consumo nacional de energía, con un notorio avance del gas natural en los últimos años en desmedro del carbón. Adicionalmente, en los últimos años se ha observado un importante aumento en las fuentes renovables. El petróleo es una fuente de energía relevante, pero a diferencia de las demás, buena parte de éste debe importarse.

La figura siguiente muestra la evolución de las fuentes de energía primaria en Australia.

Gráfico 9. Consumo de energía primaria en Australia. Sobre el petróleo, la franja de color amarillo representa los biocombustibles y basura, el verde oscuro las ERNC y el verde claro la generación hidráulica.



Fuente: AIE.

<sup>15</sup> Más detalles se encuentran en el sitio del Ministerio de Negocios, Innovación y Empleo del país, <https://www.mbie.govt.nz/building-and-energy/energy-and-natural-resources/energy-strategies-for-new-zealand>



---

Australia también es un importante exportador de uranio, aunque el país no cuenta con centrales nucleares propias para su uso ni con la capacidad de enriquecer el uranio, por lo que esta tarea es normalmente contratada por los compradores del mineral.

En 2019, el Gobierno de Australia presentó un Plan Estratégico de Energía que tiene como objetivo anticiparse a la evolución de los mercados de la energía, en los que se espera que el uso de la electricidad se incremente, de la mano de un aumento de la penetración de ERNC y de un alza en los precios del gas natural en los mercados externos. Este plan considera una serie de resultados y objetivos, los que se evaluarán mediante una serie de indicadores medibles. Entre estos, se cuentan resultados asociados a la resiliencia del sistema.

#### *4.1.1.6. Países Bajos*

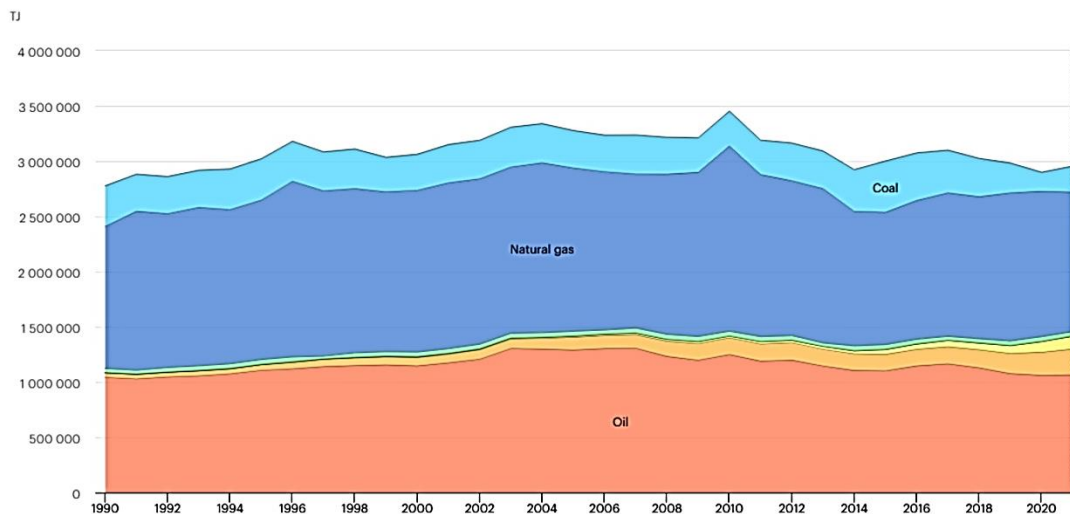
Los países bajos forman parte de la Unión Europea, de manera que está, por una parte, integrado a la red eléctrica de la Unión y por otra está sujeto a las normas de seguridad de petróleo que ésta establece.

Al igual que otras naciones desarrolladas, Países Bajos ha observado una reducción en el consumo de energía en los últimos años, especialmente desde en la segunda década del presente siglo, como se observa en la figura. Esto se explica principalmente por la evolución de las actividades económicas y la introducción de medidas de eficiencia energética, al igual que en otras naciones desarrolladas.





Gráfico 10. Consumo de energía primaria en Países Bajos. Sobre el petróleo, la franja de color naranja representa los biocombustibles y residuos, el amarillo las ERNC y el verde claro la generación nuclear



Fuente: AIE.

También se puede observar la gran dependencia de Países Bajos respecto de los combustibles fósiles, ya que las fuentes de tipo renovable tienen una participación bastante menor. No obstante, se observa un crecimiento de las ERNC en los últimos años, especialmente con la instalación de parques eólicos de costa afuera.

x

Por una parte, Países Bajos debe cumplir con los requisitos de interconexión fijados por la Unión, los que en la actualidad fijan que las capacidades de interconexión deben ser al menos de un 15% de la capacidad instalada para 2030<sup>16</sup>. A este objetivo se agrega que la interconexión debe ser al menos un 30% del peak de demanda y también un 30% de la capacidad instalada de renovables.

Por otro lado, los proyectos de inversión eléctrica que se generen en los planes de inversión de los operadores del sistema deben someterse a un análisis multicriterio, en el que se consideran varios indicadores relativos a la resiliencia. En el caso de proyectos de transmisión, se incorporan indicadores

<sup>16</sup> Para 2020, este valor era de 10%



---

de flexibilidad y seguridad de suministro. Sin embargo, estos indicadores son de momento cualitativos, y el desarrollo de indicadores cuantitativos es una tarea pendiente. De esta forma, se trata de indicadores “no maduros”<sup>17</sup>.

En lo referente a petróleo, se trata de un exportador importante, de manera que en términos de resiliencia el país solo está obligado a cumplir con la norma de la UE que lo obliga a mantener reservas de emergencia que equivalen a 61 días de consumo interno.

#### *4.1.1.7. Noruega*

Noruega es un gran proveedor neto de energía, especialmente de combustibles fósiles hacia el resto de Europa, y cuenta con grandes recursos renovables, de manera que su electricidad proviene principalmente de fuentes hidroeléctricas, a las que en los últimos años se han agregado las ERNC. Noruega no forma parte de la Unión Europea, pero su sistema eléctrico está interconectado al de los países de ésta, de manera que obtiene un respaldo de estos países, pero principalmente tiene una capacidad de exportar electricidad.

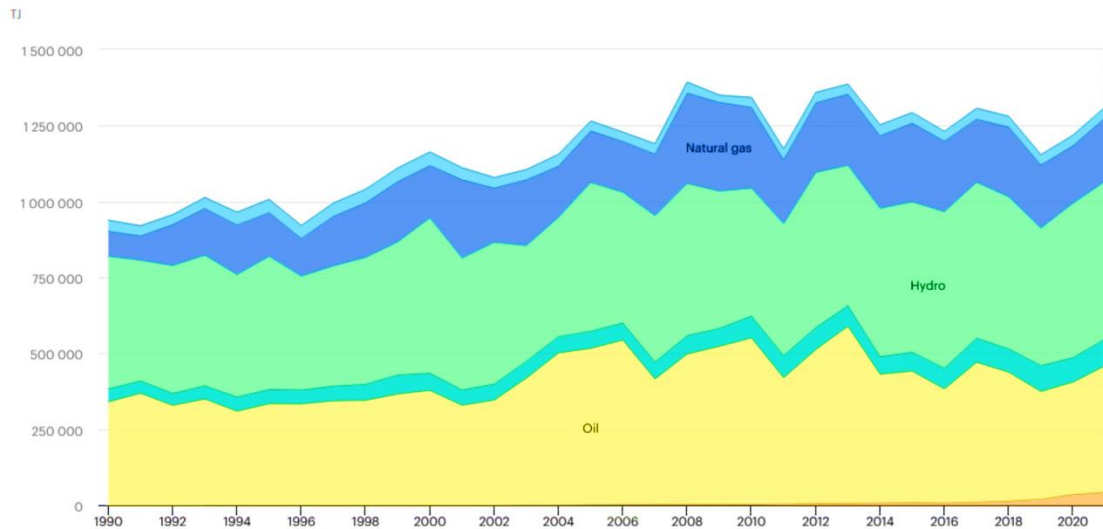
La figura siguiente muestra la evolución del consumo energético del país y sus fuentes. Se puede ver que la hidroelectricidad es relevante, junto con el petróleo. El consumo total de energía no tiene una tendencia creciente desde mediados de la primera década del presente siglo.

---

<sup>17</sup> Como se presenta en la nueva versión de la Metodología de Análisis de Costo - Beneficio para proyectos de infraestructura eléctrica, disponible online en <https://www.entsoe.eu/news/2023/04/26/new-version-of-cba-4-0-methodology-for-assessing-electricity-infrastructure-projects/>



Gráfico 11. Consumo de energía primaria en Noruega



Fuente: Agencia Internacional de Energía.

Noruega ha realizado un gran esfuerzo modernizando su sistema eléctrico, pero sus énfasis han sido en torno a seguridad energética y mitigación más que adaptación y resiliencia<sup>18</sup>. Se debe notar que entre los efectos del cambio climático en el país se cuenta un aumento en las precipitaciones (con el consiguiente efecto sobre la generación hidroeléctrica), y un menor uso en sistemas de calefacción.

En cuanto a combustibles fósiles, el país es un exportador neto de gas y petróleo, de manera que no está obligado a mantener inventarios, pese a ser miembro de la Agencia Internacional de Energía.

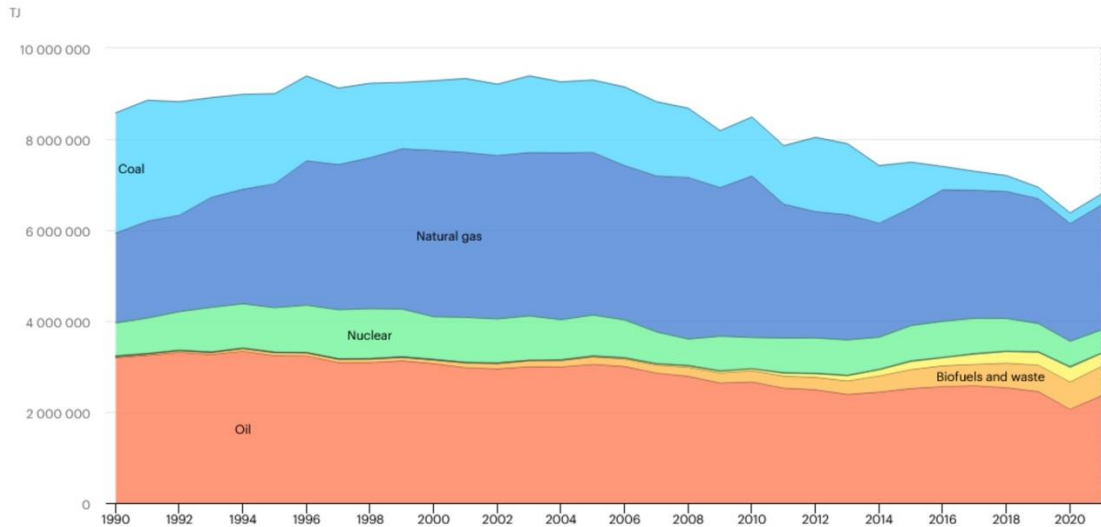
#### 4.1.1.8. Reino Unido

El Reino Unido formó parte de la Unión Europea, de manera que buena parte de su política energética está influida por la normativa de la Unión, aunque en los últimos años ha generado una normativa propia. Al igual que otros países antes señalados, el Reino Unido ha visto reducido su consumo de energía en los últimos años, mientras que ha visto aumentada su capacidad instalada gracias a la ejecución de proyectos de energía renovable. La figura siguiente muestra la evolución en el consumo de energía primaria en el país.

<sup>18</sup> Como se indica en el artículo de la Agencia Internacional de Energía <https://www.iea.org/articles/norway-climate-resilience-policy-indicator>



Figura 17. Consumo de energía primaria en el Reino Unido. La franja amarilla representa las ERNC



Fuente: Agencia Internacional de Energía.

Se puede ver que, desde mediados de la primera década del presente siglo, el consumo total de energía ha disminuido, lo que ha ido de la mano de la caída en el uso de combustibles fósiles, especialmente del carbón. Tanto biocombustibles como las ERNC han marcado un aumento, pero no representan una fracción muy relevante aún.

En lo referente a transmisión y distribución, el país ejecuta planes quinquenales de inversión y control de precios, los llamados RIIO, que deben ser ejecutados por las empresas respectivas. Estos planes son controlados desde la Oficina de Mercados de Gas y Electricidad del país (OFGEM). En la actualidad, se encuentra en ejecución el plan RIIO-2, que cubre la transmisión eléctrica y de gas en el período 2021-2026 (RIIO-T2), la distribución eléctrica en el período 2023 – 2028 (RIIO-ED2) y la distribución de gas en el período 2021-2026 (RIIO-GD2). En estos planes, se considera la ejecución de medidas para enfrentar riesgos climáticos y aumentar la resiliencia del sistema.

Finalmente, en lo referente a petróleo, Reino Unido fue un exportador neto hasta 2017, y desde entonces ha importado pequeñas cantidades de petróleo, especialmente desde Noruega. Una herencia de la pertenencia a la UE es la mantención de inventarios de emergencia de petróleo, que en este caso corresponden a 61 días de consumo interno.



#### 4.1.2. Detalle de casos

Se presenta a continuación un detalle de los casos de Japón, California, Reino Unido y Australia, por tratarse de casos en los que existen normativas con interesante profundidad y diversidad en su acción.

##### 4.1.2.1. Japón

Se presenta a continuación el detalle de los indicadores del 6º Plan Estratégico, junto a los valores objetivo de cada uno

##### Indicadores generales

1. *Ahorro de energía* = [Consumo de energía final en 2013] – [Consumo de energía final en año x]

Se expresa en m<sup>3</sup> (kL). El objetivo para 2030: sube de 50,3 (en 5º plan) a 62 millones de kL equivalentes de crudo; (en 2019 se había alcanzado era 16,55 millones de kL). El valor base (2013) es de 350 millones de kL. Se debe notar que parte de este resultado se puede explicar por la reducción y el envejecimiento de la población

2. *Razón de energía emisión cero* =  $\frac{[Energía\ final\ proveniente\ de\ fuentes\ de\ emisión\ cero]}{[Energía\ final\ total]}$

En este caso se considera energía de emisión cero a aquella que proviene de renovables, incluyendo hidroeléctrica, y la nuclear. Se expresa en porcentaje. El objetivo fijado para 2030 en 6º plan: sube de 44% a 58%. Era 12% en 2019.

3. *Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>* =  $\frac{[Emisiones\ de\ CO_2\ de\ energía\ en\ 2013] - [Emisiones\ de\ CO_2\ en\ energía\ en\ año\ x]}{[Emisiones\ de\ CO_2\ de\ energía\ en\ 2013]}$

Se expresa en porcentaje. El objetivo fijado para 2030: sube de 25 a 45%.

4. *Tasa de autosuficiencia energética* =  $\frac{[Energía\ final\ de\ fuentes\ domésticas]}{[Energía\ final\ total]}$

Se expresa en porcentaje. El objetivo fijado para 2030 con el sexto plan pasa de 25 a 30%

En Japón también existe interés por aumentar la autosuficiencia tecnológica al asegurar las *core technologies* en la cadena de suministro. En este sentido, se establece un objetivo de 80% de metales base propios. Los metales propios se componen de metales reciclados y metales importados desde faenas mineras (principalmente en el extranjero) con propiedad de empresas japonesas.



### Indicadores para electricidad

1. Se fijan porcentajes de meta de la energía provenientes de cada fuente.

Fuente	Porcentaje 2019	2030 (5° plan)	2030 6° plan
Renovables	18	22-24	36-38
Hidrógeno/amoníaco	0	0	1
Nuclear	6	20-22	20-22
GNL	37	27	20
Carbón	32	26	19
Petróleo y derivados	7	3	2

2. Costo total de producción de la electricidad. Se fija un valor total en el rango de 8,6 a 8,8 billones de JPY, por debajo del valor de 9,2-9,5 billones del 5° Plan.

Se hace notar que el respaldo de las renovables tendrá algún efecto en el costo, especialmente porque la generación térmica tendrá un mayor número de ciclos de entrada-salida para respaldar la generación variable.

3. Costo medio de la energía. Se refiere al costo de producción de cada kWh neto (generado menos pérdidas de transmisión), y no necesariamente a los precios finales de venta. Se fija un objetivo en el rango 9,9 – 10,2 JPY/kWh. Este valor supera al del 5° plan para ese año, que tenía valores de 9,4 – 9,7 JPY/kWh. Esta alza se explica por la incorporación de metas más ambiciosas en cuanto a fuentes de generación (especialmente renovables).

Como puede verse, los indicadores respecto a resiliencia ponen un énfasis en los riesgos geopolíticos, de manera que tienen un especial foco en la reducción de dependencia de suministros externos, especialmente si no existen compromisos de largo plazo.

#### 4.1.2.2. California

En primer lugar, la norma relevante de California es la Reserva Estratégica de Fiabilidad. Esta normativa está formada por programas<sup>19</sup>:

<sup>19</sup> Como se detalla en el sitio de la Comisión de Energía de California, <https://www.energy.ca.gov/data-reports/california-energy-planning-library/reliability/strategic-reliability-reserve>



**Programa de Activos Distribuidos de Respaldo Eléctrico.** Que genera un fondo para incentivar la instalación de unidades limpias y eficientes que contribuyan a la estabilidad del sistema, como sistemas de baterías o celdas de combustible.

**Programa de Apoyo a la Red del Lado de la Demanda.** Que provee incentivos para que clientes reduzcan su demanda en el caso de condiciones extremas que pongan al límite la capacidad de la red.

**Programa de Reserva Estratégica de Fiabilidad de Suministro Eléctrico.** Que mantiene unidades generadoras antiguas como reservas para casos de emergencia.

En segundo lugar, el Operador Independiente del Sistema de California (CA-ISO), realiza el seguimiento de la fiabilidad y resiliencia del sistema eléctrico del Estado. Para ello genera para cada verano (la temporada más crítica) el cálculo del indicador 1-in-10. Este indicador se refiere a que existe una probabilidad de 1 en 10 años de existir una insuficiencia de potencia que implique desconexión de usuarios (y por ende, apagón)<sup>20</sup> independiente de la magnitud o duración del evento. Para ello se considera la hora más crítica (20.00 horas de un día de verano), y las condiciones de generación existentes para esa temporada en el Estado. Este indicador es un estándar para los sistemas del país, aunque existen variaciones en su forma de medición<sup>21</sup>.

De esta forma, se reporta el exceso (o deficiencia) de potencia eléctrica para cumplir con ese indicador. En el caso de 2023, se reportó un exceso de 200 MW para el 1 de junio y un exceso de 2.300 MW para el 1 de septiembre. Según lo reportado en el estudio respectivo, bajo condiciones hidrológicas normales, el valor para junio hubiera sido de un déficit de 1.100 MW, mientras que en septiembre apenas habría habido un exceso de 960 MW. La diferencia entre ambos valores se asocia a las variaciones en los caudales de los ríos, a la entrada en operación de nuevas unidades generadoras y de otras de almacenamiento.

Otro indicador que se utiliza es margen de reserva de punta (PRM<sup>22</sup>), que se calcula como

$$PRM = \left( \frac{\text{Potencia total disponible en horario punta}}{\text{Demanda en hora punta}} - 1 \right) \cdot 100$$

<sup>20</sup> Estos eventos se denominan LOLE, por *Loss Of Load Event*

<sup>21</sup> Para más detalles, se recomienda leer el análisis comparativo presentado en el documento encargado por la FERC, disponible en <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-05/02-07-14-consultant-report.pdf>

<sup>22</sup> *Peak Reserve Margin*



Se debe notar que este indicador no necesita un análisis aleatorio como el caso anterior, pero sí requiere de un valor objetivo. En el caso de California, se ha fijado valores de un 15 % para 2022, 16% para 2023 y 17% para 2024. El valor para 2023 fue cumplido con holgura.

Como se ve, el énfasis en California tiene que ver con la generación, ya que el Estado ha mostrado un fuerte déficit que ha sido manejado, dentro de lo posible, con importaciones de energía. Sin embargo, el uso de estos indicadores ha permitido justificar la inclusión de fuentes de energía adicionales que han mejorado la resiliencia y con ello alejan el riesgo de racionamientos que fue bastante fuerte en años anteriores.

#### *4.1.2.3. Australia*

El Plan Estratégico de Energía de 2019<sup>23</sup> considera hacerse cargo de la evolución de los mercados de la energía, que incluye un mayor uso de la electricidad, los mayores precios del gas natural a causa de las exportaciones, y la penetración de energías renovables, en inversiones de diversa escala. Para esto el plan considera cinco resultados deseables:

- Sistemas seguros de electricidad y gas.
- Inversión eficiente y oportuna en las redes.
- Suministros de gas y electricidad fiables y de baja emisión.
- Desarrollo de mercados abiertos y competitivos.
- Energía a precio asequible y clientes satisfechos.

Cada uno de estos resultados se asocia a varios objetivos. En este sentido, la seguridad de los sistemas de suministro se asocia a:

- Mercados operan en forma segura y eficiente, en todas las condiciones de operación, con un mínimo de intervenciones.
- La planificación y el desarrollo del sistema se informa mediante reglas claras y transparentes.

La fiabilidad y baja emisión, a su vez, se asocia a:

- Los sectores de gas y electricidad cumplen al menos con sus reducciones de emisión comprometidas a la vez que aseguran un suministro fiable
- Los inversionistas manejan eficientemente los riesgos de apoyar las decisiones de invertir, operar, retirar e innovar.

<sup>23</sup> Disponible en <https://www.energy.gov.au/government-priorities/energy-ministers/energy-ministers-publications/strategic-energy-plan>





A su vez, los resultados se asocian a distintas acciones a tomar, las que tienen plazos que se separan entre corto (S), mediano (M) y largo (L). Las acciones relevantes a los resultados antes detallados son las que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 11. Acciones relevantes a los resultados presentados.

Acción	Descripción	Plazo
Ciberseguridad	Investigación de opciones para hacerse cargo de ciberriesgos en todos los sistemas y mercados energéticos	S
Seguridad de combustibles	Investigación de opciones para asegurar disponibilidad de carbón y gas para asegurar suministro	M
Plan de acciones para la seguridad y fiabilidad del sistema	La obligación de fiabilidad del vendedor (RRO) y la evaluación relacionada del mecanismo de Trader de Reserva de Fiabilidad y Emergencia (RERT), que darán más confianza en que los participantes del mercado invertirán en mantener la fiabilidad del sistema	S
	El Plan de Trabajo de Control de Frecuencia, que es un plan colaborativo entre distintas entidades que establece acciones para apoyar la operación segura y estable del sistema en relación al control de frecuencia	S
	El Proyecto de Mecanismos de Intervención y Fortaleza del Sistema, que evaluará la efectividad del marco de intervenciones para el manejo de la seguridad del sistema y otros elementos relacionados	M

Fuente: energy.gov.au

Finalmente, estas acciones darán origen a una serie de métricas que deberán ser reportadas por quienes corresponda. El listado de métricas relevantes a las acciones antes señaladas se presenta a continuación en la siguiente tabla.

Como se puede ver, Australia fija sus objetivos en buena medida en la generación de reglas claras que faciliten la llegada de inversión privada en el sistema energético del país, a la vez que se entregan suministros de calidad. En este sentido, la resiliencia pasa a ser una de las características que definen un mercado de condiciones predecibles para sus distintos actores, así como una condición del sistema en el que se observan pocas fallas.



Tabla 12. Listado de métricas relevantes a las acciones presentadas.

Métrica	Fuente
<b>Objetivo: Mercados operan en forma segura y eficiente, en todas las condiciones de operación, con un mínimo de intervenciones.</b>	
Número de intervenciones al sistema relacionadas con su seguridad	Operador del Mercado de Gas y Electricidad (AEMO) <i>Informe Anual de Performance del Mercado</i> , del Panel de Fiabilidad
Factor de disponibilidad de plantas de gas	Comisión del Boletín de Gas del AEMO
<b>Objetivo: La planificación y el desarrollo del sistema se informa mediante reglas claras y transparentes</b>	
Grado en el que el trabajo en curso se hace cargo eficientemente de los riesgos de seguridad emergente	Junta de Seguridad Energética (ESB) (medición cualitativa)
<b>Objetivo: Los sectores de gas y electricidad cumplen al menos con sus reducciones de emisión comprometidas a la vez que aseguran un suministro fiable</b>	
Emisiones de los sectores de gas y electricidad como proporción de las emisiones nacionales	Departamento de Medio Ambiente y Energía <i>Inventario Nacional de Emisiones de Efecto Invernadero</i>
Cantidad de energía no entregada	Operador del Mercado de Gas y Electricidad (AEMO) <i>Informe Anual de Performance del Mercado</i> , del Panel de Fiabilidad
<b>Objetivo: Los inversionistas manejan eficientemente los riesgos de apoyar las decisiones de invertir, operar, retirar e innovar</b>	
Ajuste de las predicciones del Operador del Mercado de Gas y Electricidad (AEMO)	AEMO
Acceso a información relevante del sistema y los mercados, para apoyar una toma de decisiones efectiva y eficiente	Comisión del Mercado de Gas y Electricidad (AEMC)
Inversión comprometida en capacidad de generación y suministro de gas por región	AEMO y sus documentos de Declaración de Oportunidades (ESOO/GSOO)

Fuente: energy.gov.au

#### 4.1.2.4. Reino Unido

En el caso del Reino Unido, resulta de interés las medidas implementadas con respecto a resiliencia del sistema en el marco del período RIIO-2 para los suministros de energía.

En el caso de transmisión eléctrica, los requisitos de resiliencia se relacionan con el manejo de activos y sus fallas, la debida coordinación con las generadoras (para manejar interrupciones de suministro), la ejecución a tiempo de grandes proyectos de inversión, de manera que no se presenten cuellos de botella en la red, así como la vigilancia física y e informática (ciberseguridad) de la red.



En el caso de distribución, se tienen requisitos específicos para resiliencia ambiental. En todos los casos, los riesgos a manejar deben ser analizados por un grupo de trabajo formados por las propias empresas operadoras. Esos requisitos se dividen en cuatro categorías:

- **Resiliencia climática**, que se refiere al manejo de los impactos del cambio climático en las redes.
- **Resiliencia a inundaciones**, que es un requisito especial que se concentra especialmente en la protección de las subestaciones.
- **Riesgo de árboles y vegetación**, que se maneja con la poda y corte en los casos que corresponda
- **Métrica de resiliencia**, que corresponde a la elaboración de métricas de resiliencia para la red en general que abarquen, entre otros, los puntos anteriores. La idea es implementar estas métricas para el período venidero (RIIO-3).

Estos requisitos de resiliencia son adicionales a aquellos relacionados con la falla de activos, y al manejo de riesgos de otra naturaleza, como la ciberseguridad o la protección física.

Como se puede ver, el caso británico considera un trabajo bastante más específico con respecto a riesgo climático. Sin embargo, el análisis de los riesgos de momento se realiza caso a caso, y la generación de indicadores generales es una tarea que tendría su efecto en la operación del sistema en los años finales de la presente década.

#### 4.1.3. Resumen de indicadores

Los indicadores aquí mencionados son bastante específicos a los procesos de planificación y gestión de los sistemas energéticos de los distintos países. Por ejemplo, el procedimiento utilizado en California pone énfasis en la generación, ya que este Estado ha sido deficitario en este aspecto desde la década de 1970. Los métodos utilizados en Europa podrían ser de interés en la medida que se avance hacia indicadores cuantitativos respecto a la resiliencia. El caso británico es de interés, pero está muy asociado a la forma en que se planifican y ejecutan las inversiones en infraestructura en ese país. Además, la generación de métrica de resiliencia es una tarea que recién podría dar frutos en años venideros.



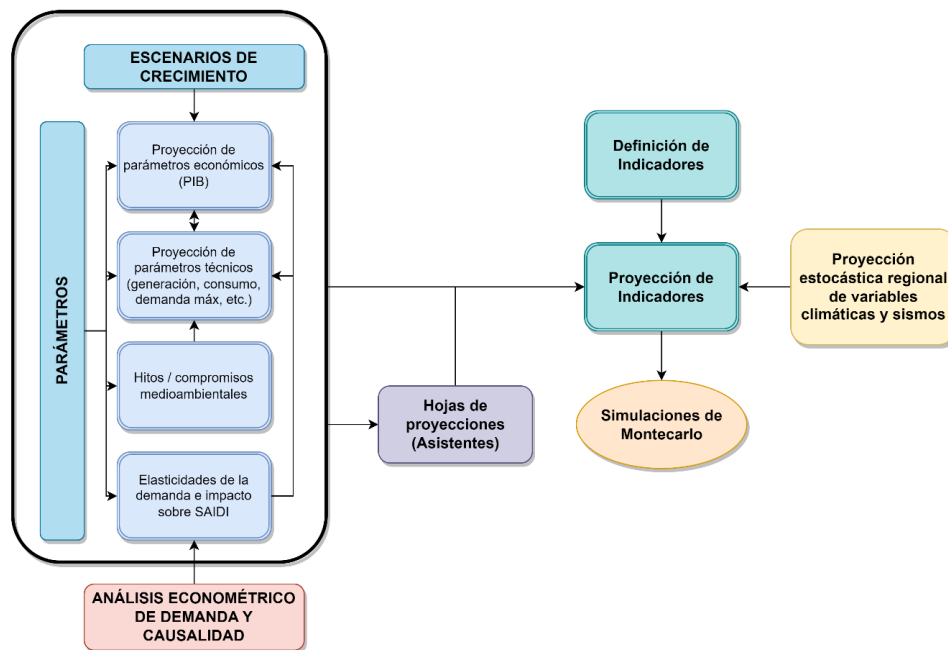
## 5. SIMULACIÓN Y PROYECCIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD Y RESILIENCIA FRENTE A AMENAZAS EXACERBADAS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO, PARA LA INFRAESTRUCTURA ENERGÉTICA

En este capítulo se proponen, simulan y proyectan al año 2060, índices de vulnerabilidad y resiliencia frente a amenazas exacerbadas por el cambio climático, para la infraestructura energética (eléctrica y combustibles).

La propuesta de índices de vulnerabilidad y resiliencia energética por amenazas exacerbadas por el cambio climático que se ajuste a la infraestructura energética en Chile identifica cada uno de ellos por segmento o subsector específico (general, generación, transmisión, almacenamiento y distribución, en el caso de la infraestructura eléctrica y producción, almacenamiento, transporte y distribución en el caso de infraestructura de combustibles). Se propone que el índice sea de alcance regional.

El modelo se estructura de la siguiente manera.

Figura 18. Estructura del modelo





---

### 5.1. Data utilizada

Se recopiló la data histórica relevante a nivel regional y nacional, como datos de generación y consumo de energía eléctrica obtenidas desde el portal Energía Abierta y el Coordinador Eléctrico Nacional, fallas en la operación (SAIDI y SAIFI) proporcionadas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).

Además, se utilizó data histórica sobre variables climatológicas a nivel regional, específicamente temperatura, precipitaciones y velocidad del viento, así como información histórica de eventos naturales o exacerbados por el cambio climático, información disponible en las plataformas del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Igualmente se utilizó data histórica asociada a indicadores macroeconómicos (PIB) disponibles en el portal web del Banco Central.

### 5.2. Indicadores calculados

Los indicadores evaluados para proyectar fueron los siguientes.



Tabla 13. Indicadores a evaluar de vulnerabilidad y resiliencia frente a amenazas exacerbadas por el cambio climático, para la infraestructura energética eléctrica.

Segmento/Subsector	Índice Cuantitativo	Data Requerida	Fórmula de Cálculo	Justificación	Factibilidad de cálculo / Restricciones
Generación eléctrica	Índice de Dependencia de Potencia Firme (IDPF)	Capacidad total de generación firme, demanda máxima del sistema	Capacidad total de generación firme / Demanda máxima	Resiliencia: Un IDPF mayor a 1 indica que el sistema tiene capacidad adicional para enfrentar imprevistos y garantizar un suministro constante.	Existe la data para calcular el indicador.
Distribución eléctrica	SAIDI y SAIFI regional y país.	Nº de usuarios afectados por cortes, duración promedio de cortes, número de clientes por región y país.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Duración promedio de cortes * Nº de usuarios afectados/ Nº total de clientes</li> <li>Nº de usuarios afectados por cortes/ Nº total de clientes</li> </ul>	Resiliencia: Un SAIFI y SAIDI elevado indica un mayor impacto de interrupciones en el servicio a los usuarios.	Existe la información desagregada.
Generación eléctrica	Índice de Vulnerabilidad de Generación (IVG)	Capacidad instalada, duración de interrupciones asociadas a generación	Duración total interrupciones / Capacidad instalada	Vulnerabilidad: Un IVG alto sugiere una mayor susceptibilidad a fallos e interrupciones en las centrales de generación.	El SAIDI, en su componente “externo” se refiere a la G y T en conjunto y no por separado.
Transmisión eléctrica	Índice de Vulnerabilidad de Transmisión (IVT)	Km de líneas de transmisión, número de interrupciones, duración de interrupciones asociadas a transmisión	Duración total interrupciones / Km de líneas	Vulnerabilidad: Un IVT alto sugiere una mayor susceptibilidad a fallos e interrupciones en la red de transmisión.	El SAIDI, en su componente “externo” se refiere a la G y T en conjunto y no por separado. No se cuenta con los kms de líneas por región. Esto es especialmente complejo porque es



Segmento/Subsector	Índice Cuantitativo	Data Requerida	Fórmula de Cálculo	Justificación	Factibilidad de cálculo / Restricciones
					común que las líneas sean interregionales. Así, podría ser una alternativa considerar, en futuros análisis, indicadores a nivel sistémico y no regional.
Almacenamiento eléctrico	Índice de Capacidad de Almacenamiento (ICA)	Capacidad total de almacenamiento, demanda máxima	Capacidad total de almacenamiento / Demanda máxima	Resiliencia: Un ICA elevado refleja la capacidad del sistema para responder a las variaciones de demanda y a las interrupciones en la generación.	En Chile los sistemas de almacenamiento de energía son un tema emergente, no hay datos aún.
General	Intensidad Energética (IE)	Generación de energía total, Producto Interno Bruto (PIB) real	Generación total de energía / PIB real	Resiliencia: Un bajo valor indica una economía que utiliza la energía de manera eficiente, lo que puede indicar una infraestructura energética más resiliente y menos vulnerable a shocks externos.	Existe la data para calcular el indicador.
Generación eléctrica	Índice de Penetración de ERNC	Capacidad total de ERNC, Capacidad total de generación	Capacidad total de ERNC, Capacidad total de generación	Vulnerabilidad: Mide la dependencia del sistema en ERNC. Una mayor penetración puede aumentar la resiliencia al	Existe la data para calcular el indicador.



Segmento/Subsector	Índice Cuantitativo	Data Requerida	Fórmula de Cálculo	Justificación	Factibilidad de cálculo / Restricciones
				reducir la dependencia de combustibles importados y fósiles, pero también puede incrementar la vulnerabilidad si no se gestionan adecuadamente la variabilidad y la intermitencia.	
Generación eléctrica	Índice de Diversidad de ERNC	Capacidad de cada tecnología ERNC	Suma de (Capacidad de cada ERNC / Capacidad total de ERNC) <sup>2</sup>	Evalúa la diversidad de fuentes de ERNC en el mix energético. Una mayor diversidad puede reducir la vulnerabilidad al depender menos de una sola tecnología y aumentar la resiliencia ante fallos o interrupciones de una tecnología específica.	Existe la data para calcular el indicador.
Generación eléctrica	Ratio de Respaldos de ERNC	Capacidad de generación firme dedicada (respaldo de ERNC), Capacidad total de ERNC	Capacidad de respaldo / Capacidad total de ERNC	Indica qué proporción del sistema de ERNC tiene respaldos de potencia firme. Un valor más alto sugiere una mayor resiliencia ante interrupciones o	Existe la data para calcular el indicador.





Segmento/Subsector	Índice Cuantitativo	Data Requerida	Fórmula de Cálculo	Justificación	Factibilidad de cálculo / Restricciones
				variabilidad en la generación de ERNC.	
Generación eléctrica	Factor de Planta de ERNC	Energía generada por ERNC, Capacidad instalada de ERNC	Energía generada por ERNC (anual) / (Capacidad instalada x 8760 horas)	Revela la eficiencia y confiabilidad de la generación de ERNC. Un valor más alto puede indicar una mayor resiliencia en la generación de ERNC.	Existe la data para calcular el indicador.



### 5.3. Programación del modelo de proyección

Se desarrolló un modelo de proyección en Excel, que consta de los siguientes módulos:

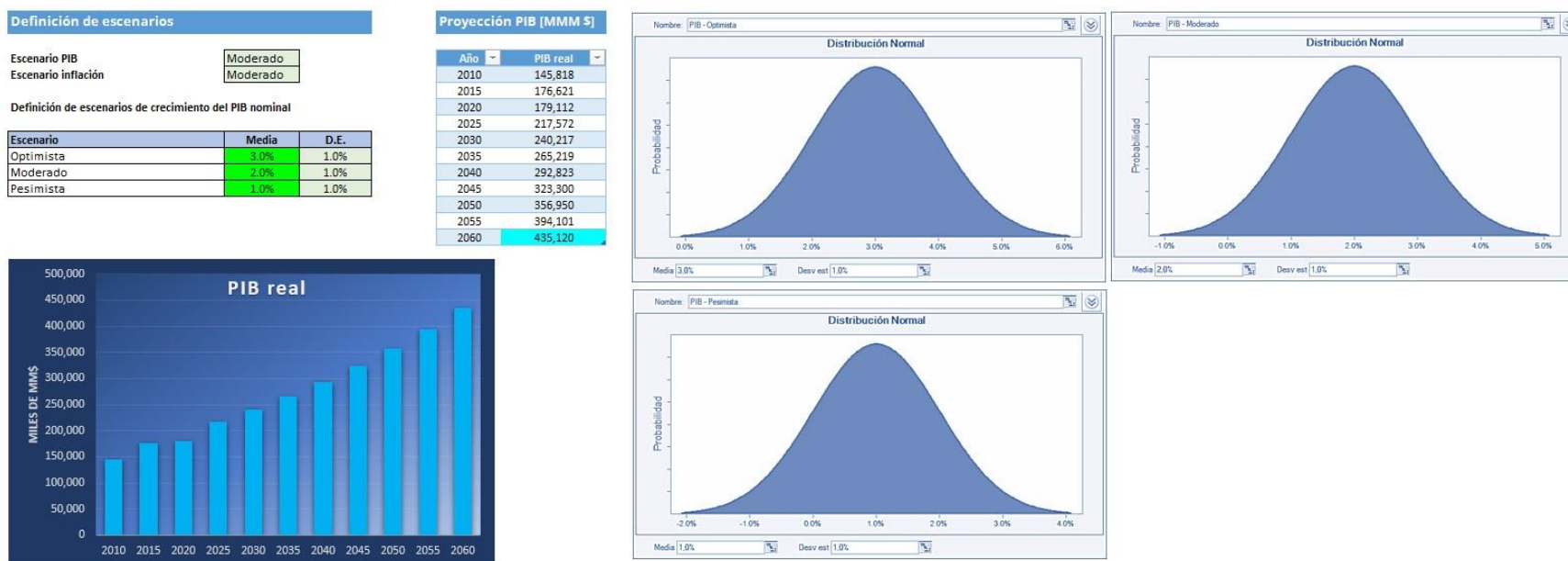
#### 5.3.1. Módulo PIB

En esta hoja se ingresan los parámetros y supuestos para la proyección del Producto Interno Bruto (PIB), necesaria para poder realizar las proyecciones de la generación de energía eléctrica.

Se debe optar por tres escenarios: optimista, moderado o pesimista. Los parámetros para cada escenario (valor esperado y desviación estándar) se deben estipular en el cuadro correspondiente. En el caso del presente informe, se estipularon las siguientes tasas de crecimiento esperado: 3% (optimista), 2% (moderado) y 1% (pesimista).



Figura 19. Módulo de PIB de la planilla de proyección.



Fuente: Elaboración propia



---

### 5.3.2. Módulo Generación Eléctrica

En este módulo se introducen los principales parámetros en los que se basará la proyección de la generación eléctrica por tipología, específicamente:

- Hitos compromisos Chile: periodo en que se prevé la total independencia de generación con carbón y diésel (y sus derivados). El modelo asume que esta disminución será lineal, desde el año 1 de proyección, hasta el año meta señalado.
- Base: se refiere a qué periodos deben considerarse como base de las proyecciones. Por ejemplo, si se marca 2018, entonces la base de proyección será el promedio a partir de 2018, hasta el último año con que se cuenta con datos, generalmente 2022.
- Distribución de la demanda por la salida de Diesel y carbón: la disminución continua de la generación por carbón y diésel (y sus derivados) debe ser asignada a otras tecnologías. En estas celdas se asigna como se distribuirá la energía que dejen de generar las tecnologías salientes, entre las tecnologías restantes (gas natural, hidráulica, ERNC y cogeneración).
- Factor de capacidad: cociente entre la energía real generada por la central eléctrica durante un período (generalmente anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese mismo período, conforme a los valores nominales de las placas de identificación de los equipos.
- Elasticidad ingreso de la demanda: valor encontrado a través de un modelo econométrico, sirve de base para proyectar la generación.



Figura 20. Módulo de ingreso de parámetros para generación

Hitos compromisos Chile		
Año carbón cero	2040	
Año Diesel cero	2035	
Base (desde año)	2018	
Distribución de la demanda por salida de Diesel y carbón		
Tecnología	Media	D.E.
GN	30.0%	5.0%
Hidráulica	22.7%	
ERNC	45.3%	
	2/3	respecto a hidro
Cogeneración	2.0%	0.5%
Factor de capacidad		
Tecnología	Media	D.E.
Petróleo	40%	10.0%
Carbón	75%	10.0%
GN	80%	10.0%
Hidráulica	80%	10.0%
ERNC	25%	5.0%
Cogeneración	70%	10.0%
Elasticidad ingreso de la demanda		
	Media	D.E.
Elasticidad	0.97	0.1

Fuente: Elaboración propia

Inmediatamente al costado de estas tablas de ingreso de parámetros se encuentran las tablas con las diferentes proyecciones.



Figura 21. Tablas de proyección del módulo de generación

Proyección de Generación [GWh]							
Año	Petróleo	Carbón	GN	Hidráulica	ERNC	Cogeneración	Total
2010	6,909	17,572	11,355	21,254	1,166	0	58,256
2015	2,161	28,622	11,092	23,866	2,728	134	68,603
2020	908	27,008	1,371	20,637	15,304	184	65,412
2025	1,065	18,081	12,728	17,786	18,740	439	68,840
2030	586	13,270	16,178	21,217	23,903	627	75,782
2035	0	7,304	20,194	25,158	29,917	850	83,423
2040	0	0	24,643	29,517	36,579	1,096	91,835
2045	0	0	27,128	32,494	40,268	1,207	101,096
2050	0	0	29,863	35,770	44,328	1,328	111,290
2055	0	0	32,874	39,377	48,798	1,462	122,512
2060	0	0	36,189	43,348	53,719	1,610	134,866

Año	Petróleo	Carbón	GN	Hidráulica	ERNC	Cogeneración	Total
2010	11.9%	30.2%	19.5%	36.5%	2.0%	0.0%	100%
2015	3.2%	41.7%	16.2%	34.8%	4.0%	0.2%	100%
2020	1.4%	41.3%	2.1%	31.5%	23.4%	0.3%	100%
2025	1.5%	26.3%	18.5%	25.8%	27.2%	0.6%	100%
2030	0.8%	17.5%	21.3%	28.0%	31.5%	0.8%	100%
2035	0.0%	8.8%	24.2%	30.2%	35.9%	1.0%	100%
2040	0.0%	0.0%	26.8%	32.1%	39.8%	1.2%	100%
2045	0.0%	0.0%	26.8%	32.1%	39.8%	1.2%	100%
2050	0.0%	0.0%	26.8%	32.1%	39.8%	1.2%	100%
2055	0.0%	0.0%	26.8%	32.1%	39.8%	1.2%	100%
2060	0.0%	0.0%	26.8%	32.1%	39.8%	1.2%	100%



“Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático”

Informe Final

Capacidad instalada, potencia firme y demanda máxima [MW]				Intensidad Energética [MWh/MM\$]	
Año	Capacidad instalada	Potencia firme	Demanda máxima	Año	IE
2010	15,848	7,508	8,382	2010	0.40
2015	20,093	9,186	9,867	2015	0.39
2020	26,463	10,358	10,907	2020	0.37
2025	28,696	15,783	10,135	2025	0.32
2030	27,828	15,179	10,391	2030	0.32
2035	27,986	14,739	10,673	2035	0.31
2040	29,916	14,666	10,983	2040	0.31
2045	31,600	15,087	11,325	2045	0.31
2050	33,454	15,551	11,701	2050	0.31
2055	35,495	16,061	12,115	2055	0.31
2060	37,890	16,741	12,571	2060	0.31

Diversidad (HC-Hidra-ERNC) e IDPF			Penetración de ERNC [%]	
Año	Diversidad	IDPF	Año	Penetración ERNC
2010	0.512	1.116	2010	2.0%
2015	0.495	1.074	2015	4.0%
2020	0.356	1.053	2020	23.4%
2025	0.359	0.642	2025	27.2%
2030	0.340	0.685	2030	31.5%
2035	0.336	0.724	2035	35.9%
2040	0.344	0.749	2040	39.8%
2045	0.344	0.751	2045	39.8%
2050	0.344	0.752	2050	39.8%
2055	0.344	0.754	2055	39.8%
2060	0.344	0.751	2060	39.8%

Fuente: Elaboración propia



### 5.3.3. Módulo de interrupciones del servicio

En este módulo se ingresan los parámetros tendientes a proyectar los coeficientes SAIDI y SAIFI a nivel regional. Específicamente, se ingresan los parámetros obtenidos en los análisis de regresión para encontrar una causalidad de estos indicadores con variables climáticas (ver capítulo 3.3).

Figura 22. Ingreso de parámetros en el Módulo de interrupciones.

Impactos en SAIDI					
País			Región		
Variables	Media	D.E.	Variables	Media	D.E.
pp	0.0003109	8.39E-06	pp	0.0057616	0.0001631
Tº max			Tº max		
sismo			sismo		
epicentro			epicentro		
velocidad del viento	0.0001094	0.0000103	velocidad del viento	0.0032079	0.0001965
ola de calor			ola de calor		
cte	0.0005003	0.0004648	cte	0.0027112	0.004294
Impactos en SAIFI					
País			Región		
Variables	Media	D.E.	Variables	Media	D.E.
pp	0.000087	4.22E-06	pp	0.0016935	0.0001014
Tº max			Tº max		
sismo			sismo		
epicentro			epicentro		
velocidad del viento	0.0000461	5.18E-06	velocidad del viento	0.0014741	0.0001234
ola de calor			ola de calor	0.0070532	0.0041153
cte	0.0006822	0.0003074	cte	0.0106495	0.0034566

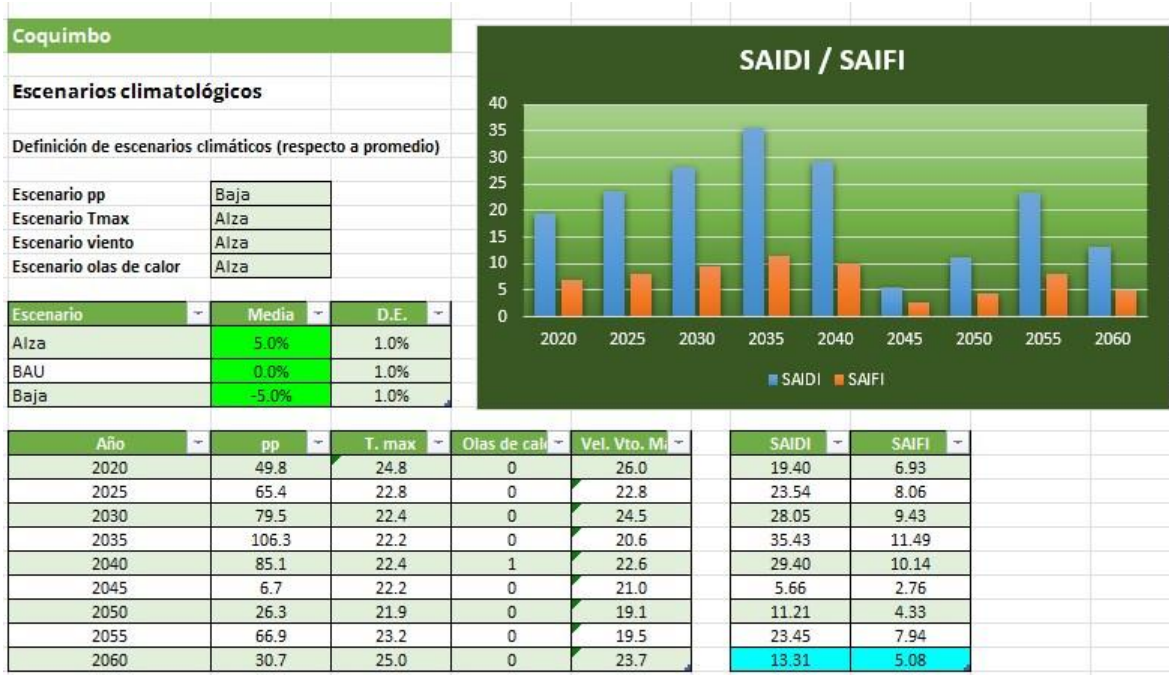
Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros, y junto con realizar una proyección de las variables climáticas, se pudo proyectar ambos indicadores anuales, por región.





Figura 23. Proyecciones de los indicadores SAIDI y SAIFI.



Fuente: Elaboración propia

Las proyecciones climáticas se realizaron considerando tres escenarios: Alza, BAU (sin cambios) y Baja. Estas alzas y bajas corresponden a aumentos o bajas porcentuales sobre el valor esperado del indicador climático. Por su parte, este valor se obtuvo aleatoriamente, usando como parámetros de una distribución normal la media y desviación estándar observadas para cada variable. Para el modelamiento, se consideró que un “Alza” implica valores un 5% superiores a los esperados, mientras que en el caso contrario, es decir “Baja”, se utiliza el mismo porcentaje, pero en el sentido opuesto.



#### 5.4. Modelamiento estocástico y escenarios probables

En el modelo se utilizó la técnica de simulaciones de Montecarlo para llevar a cabo proyecciones estocásticas, utilizando el software Crystall Ball. Este enfoque implica la generación repetida de valores aleatorios para las variables consideradas, de acuerdo con sus distribuciones de probabilidad, con el fin de explorar posibles resultados futuros.

Las simulaciones de Montecarlo son herramientas estadísticas que utilizan el muestreo aleatorio para obtener resultados numéricos de modelos que pueden tener una gran cantidad de incertidumbre. Estas son especialmente útiles en el contexto de la vulnerabilidad y la resiliencia energética debido a las incertidumbres inherentes a la proyección de eventos climáticos, la evolución tecnológica y las respuestas del sistema energético a estas variables.

- Los principales parámetros aleatorios, como la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos o las elasticidades y tasas de crecimiento, pueden modelarse mediante distribuciones de probabilidad. Por ejemplo, si se espera que el cambio climático aumente la frecuencia de sequías en una región determinada, pero no se sabe exactamente cuánto, se podría modelar esa incertidumbre con una distribución normal, triangular o cualquier otra que se ajuste a la naturaleza del parámetro.
- Mediante el uso de números aleatorios y las distribuciones asignadas a los parámetros, la simulación de Montecarlo genera miles de escenarios posibles. Cada escenario representa una posible "realidad" basada en esas distribuciones.
- Para cada escenario, se evalúan los indicadores de vulnerabilidad y resiliencia.

Las salidas de las diferentes simulaciones, al año 2060, se presentan en el Anexo 1.



---

## 6. POLÍTICAS Y NORMATIVA VIGENTES EN CHILE EN MATERIA DE RIESGOS, VULNERABILIDAD Y RESILIENCIA EN EL SECTOR ENERGÉTICO

---

Tal como lo analizado por el Ministerio de Energía y la Energy Partnership Chile-Alemania en el estudio “Análisis de Infraestructura resiliente a la crisis climática para el sector energético” (Centro de Energía de la Universidad de Chile, 2023), el corazón del mercado eléctrico chileno está en el DFL1 de 1982 “Ley General de Servicios Eléctricos” (LGSE). Esto debido a que en esta ley se encuentra la base de los esquemas de precios de energía y potencia que deben ser pagados por los consumidores a los productores, tanto a nivel de mercado de corto plazo (spot) como en el mercado mayorista.

Según lo identificado en el estudio, existe una intersección entre los conceptos de resiliencia y adaptación climática con los de confiabilidad de los sistemas eléctricos, que pueden ser divididos entre seguridad y suficiencia. Así, el Centro de Energía de la Universidad de Chile (2023) realizó una revisión de la LGSE identificando aquellos artículos que traten sobre seguridad y calidad de suministro. Estos son:

- Artículo 72°-1. Principios de la Coordinación de la Operación (“Preservar la seguridad del servicio en el sistema eléctrico...”);
- Artículo 72°-6. Seguridad del Sistema Eléctrico (“El Coordinador deberá exigir a los coordinados el cumplimiento de la normativa técnica... SCCC y calidad...”);
- Artículo 72°-7. Servicios Complementarios.
- Artículo 72°-12. Coordinación de los Intercambios Internacionales de Energía;
- Artículo 72°-15. Del Desempeño del Sistema de Eléctrico y de los niveles de Seguridad de Servicio (“...reportes de desempeño...”);
- Artículo 72°-18. Retiro, modificación y desconexión de instalaciones;
- Artículo 72°-19. Normas Técnicas para el funcionamiento de los sistemas eléctricos;
- Artículo 72°-21. Decreto de Emergencia Energética;
- Artículo 74°. Definición de Sistema de Transmisión Nacional;
- Artículo 78°. Definición de Sistema de Interconexión Internacional;
- Artículo 80°. Acceso Abierto en los Sistemas de Transmisión Dedicados;
- Artículo 82°. Intercambio Internacional de Servicios Eléctricos;
- Artículo 87°. Planificación de la Transmisión;
- Artículo 89°. Obras Nuevas y Obras de Ampliación de los Sistemas de Transmisión;
- Artículo 131° bis. (Comisión y licitaciones);



- Artículo 133°. Las exigencias de seguridad y calidad de servicio que se establezcan para cada licitación...;
- Artículo 146° ter. El procedimiento concursal de liquidación de una empresa generadora, transmisora o distribuidora de electricidad...;
- Artículo 149°. (...transferencias de energía entre empresas eléctricas... energía y potencia, valorización, suficiencia, ...);
- Artículo 170°. precios de nudo y porcentaje de los mayores costos por planes de seguridad de abastecimiento...;
- Artículo 183°. (áreas típicas de distribución, estudios de costo y estándares de seguridad y calidad...);
- Artículo 225°. (definiciones, confiabilidad, suficiencia, seguridad de servicio, ...).

Por otra parte, la implementación de la LGSE ha sido complementada por diferentes reglamentos y normas. Estos también fueron analizados en el marco del estudio y, a continuación, en la Tabla 11 se muestran aquellos que deberían ser revisados y adaptados, con mayor énfasis o esfuerzo, a los nuevos objetivos de resiliencia climática (Centro de Energía de la Universidad de Chile, 2023)<sup>24</sup>.

Tabla 14. Principales reglamentos sector eléctrico que requieren adecuación por resiliencia climática.  
Fuente: Adaptada de Centro de Energía de la Universidad de Chile (2023)

#DS	Fecha / Modif	Documento (Reglamento)	Materia	Comentarios
37	05-2019	Sistemas de transmisión y de la planificación de la transmisión	Planificación Tx	Instalaciones, estándares y criterios de evaluación de planificación, confiabilidad
113	11-2017	Servicios Complementarios LGSE	SSCC	Criterios operacionales, instalaciones, confiabilidad
67	07-2017	Modifica DS106/2015-Energía, Reglamento sobre licitaciones de suministro de clientes regulados en Dx	Licitaciones	Estándares de suficiencia de suministro
106	10-2015	Licitaciones de Suministro de Energía para Satisfacer el Consumo de los Clientes Regulados en Dx	Licitaciones	Estándares de suficiencia de suministro
29	03-2014	Licitaciones para la Provisión de Bloques Anuales de Energía Provenientes de Medios de ERNC [Regl. Ley 20.698 (20/25)]	Licitaciones	Estándares de suficiencia de suministro
31	03-2017	Determinación y pago de las compensaciones por indisponibilidad de suministro eléctrico	Compensaciones	Estándares de suficiencia de suministro

<sup>24</sup> Cabe destacar que Centro de Energía de la Universidad de Chile (2023) analiza todos aquellos reglamentos y normativas que debieran ser modificados, en una escala del 1 al 4, donde 4 es mayor énfasis o esfuerzo. En la Tabla 11 solo se presentan aquellos con puntaje 4, es decir, más prioritarios.



“Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático”

Informe Final

#DS	Fecha / Modif	Documento (Reglamento)	Materia	Comentarios
142	11-2016	Requisitos/procedimiento solicitudes de intercambios internacionales de servicios eléctricos	Intercambios Internacional	Estándares de suficiencia de suministro, confiabilidad
134	10-2016	Planificación energética de largo plazo	Planificación Tx	Instalaciones, directrices, estándares y criterios de evaluación en planificación, confiabilidad
128	09-2016	Centrales de bombeo sin variabilidad hidrológica [Reglamento centrales de bombeo]	Almacenamiento	Instalaciones, Suficiencia, Flexibilidad, Pago por capacidad
68	06-2015	Modifica DS86/2012-Energía, Reglamento para la fijación de precios de nudo	Precios de Nudo	Estándares de suficiencia de suministro y su efecto en tarifas
6	01-2015	Exigencias para instalaciones de cogeneración eficiente	Cogeneración	Instalaciones
38	04-2012	Medidas para Evitar, Reducir y Administrar Déficit de Energía Art.163 LGSE	Compensaciones	Estándares de suficiencia de suministro
23	03-2015	Operación y administración de los sistemas medianos establecidos en la Ley General de Servicios Eléctricos [Reglamento sistemas medianos]	General	Criterios operacionales, instalaciones, confiabilidad
62/2 006	06-2020	Transferencias de Potencia entre Empresas Generadoras	Potencia de Suficiencia	Instalaciones, Suficiencia, Flexibilidad, Pago por capacidad

Tabla 15. Principales normas eléctricas que requieren adecuación por resiliencia climática.

Fuente: Adaptada de Centro de Energía de la Universidad de Chile (2023)

#REx	Fecha	Documento (Norma Técnica)
	01-09-2020	Seguridad y Calidad de Servicio (+21 Anexos Técnicos)
763	10-12-2019	Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (+1 Anexo Técnico)
786	18-12-2019	Servicios Complementarios (+1 Anexo Técnico)
196	28-04-2019	Presupuesto de Costos...Resolución Exenta CNE N° 164, de 2010 de CNE con normas para aplicación del art.14,8° del LGSE (Convenios de aumento/reducción carga clientes regulados)
54	01-01-2016	Transferencias de Potencia entre Empresas Generadoras
376	28-06-2019	Norma Técnica para la Programación y Coordinación de la Operación de Unidades que utilicen GNL
179	14-03-2018	De Seguridad y Calidad De Servicio Para Sistemas Medianos



---

## 7. PROPUESTA DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA O REDUCIR LA VULNERABILIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA INFRAESTRUCTURA CRÍTICA ENERGÉTICA

---

La elaboración de propuestas de adaptación para la infraestructura crítica energética en Chile, especialmente en el contexto del cambio climático, requiere un enfoque integral y específico por subsector.

### 7.1. Generación eléctrica

Considerando los desafíos y patrones climáticos que afectan a la generación eléctrica en Chile, las propuestas pueden estructurarse de la siguiente manera:

#### 7.1.1. Generación Hidroeléctrica

La generación hidroeléctrica, una de las principales fuentes de energía renovable en Chile, enfrenta desafíos significativos debido a los efectos del cambio climático. La variabilidad en los patrones de precipitación y la frecuencia creciente de eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas e inundaciones, impactan directamente en la disponibilidad de recursos hídricos, afectando la eficiencia y estabilidad de las centrales hidroeléctricas. En este escenario, es muy importante implementar medidas que incrementen la resiliencia y adaptabilidad del sector hidroeléctrico a estas condiciones cambiantes. Las propuestas siguientes buscan abordar estos desafíos, enfocándose en mejorar la capacidad de las infraestructuras existentes para manejar la variabilidad hidrológica, reforzar la gestión de los recursos hídricos, y asegurar una operación eficiente y sostenible ante los crecientes impactos del cambio climático.

##### 7.1.1.1. Tipo de evento

Las variaciones en las precipitaciones, inundaciones y la acumulación de sedimentos son eventos críticos que afectan directamente la eficacia y sostenibilidad de la generación hidroeléctrica. Los cambios en los patrones de precipitación, una consecuencia directa del cambio climático, pueden resultar en periodos de sequía prolongados o en precipitaciones excesivas, alterando significativamente los caudales de los ríos y la disponibilidad de agua para las centrales hidroeléctricas. Las inundaciones, por otro lado, no solo representan un riesgo de daño físico a las instalaciones, sino que también pueden provocar una gestión más compleja del agua en los embalses. Además, la acumulación de sedimentos en ríos y embalses es un problema creciente, exacerbado por eventos climáticos extremos y la erosión



del suelo, lo cual puede reducir la capacidad de almacenamiento de los embalses y afectar la eficiencia de las turbinas. Estos eventos requieren una atención especial y estrategias adaptativas para garantizar la continuidad y eficiencia de la generación hidroeléctrica en un entorno cada vez más variable debido a los cambios globales en el clima.

#### *7.1.1.2. Medidas propuestas*

Una primera medida es mejorar la infraestructura de los embalses para manejar mejor la acumulación de sedimentos y prevenir daños por inundaciones.

- Mejora de embalses y presas
  - Reforzamiento estructural: reforzar las estructuras de presas y embalses para soportar eventos extremos como inundaciones y terremotos.
  - Sistemas de alivio de presión: implementar o mejorar los sistemas de alivio para manejar eficazmente el exceso de agua y prevenir desbordamientos.
  - Control de sedimentos: desarrollar sistemas avanzados para la gestión de sedimentos, como dragado regular, barreras y tecnologías de filtración, para mantener la capacidad de almacenamiento del embalse y proteger las turbinas.
- Mejora de las estaciones hidroeléctricas:
  - Resiliencia de equipos: mejorar la resistencia de los equipos críticos a la humedad, inundaciones y otros efectos climáticos.
  - Sistemas de monitoreo avanzados: instalar sensores y sistemas de monitoreo para detectar tempranamente condiciones potencialmente peligrosas y realizar mantenimientos preventivos.

Otra medida importante es realizar una gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico, adaptándose a la variabilidad y cambios en la disponibilidad de agua.

- Modelos hidrológicos avanzados:
  - Utilizar modelos hidrológicos para predecir cambios en la disponibilidad de agua y planificar su uso de manera eficiente.
  - Ajustar la operación de las plantas hidroeléctricas según las predicciones de flujo de agua para maximizar la eficiencia y minimizar los impactos ambientales.
- Sistemas de almacenamiento y recarga de acuíferos:
  - Capturar y almacenar agua durante períodos de alta disponibilidad para su uso durante sequías, por ejemplo, a través de:



- Construir nuevos embalses o ampliar los existentes, para aumentar así la capacidad de almacenamiento de agua. En este último caso se podría requerir reforzar las presas para mejorar su capacidad de retención, y manejar con seguridad mayores volúmenes de agua.
- Utilizar estaciones de bombeo para mover agua hacia embalses situados a mayor altura durante períodos de excedente hídrico.
- Implementar sistemas de almacenamiento por bombeo que permiten almacenar energía (en forma de agua almacenada en altitud) durante períodos de baja demanda y generar electricidad durante los períodos de alta demanda o escasez de agua.
- Desarrollar sistemas para capturar eficientemente el agua de lluvia y las escorrentías superficiales directamente en embalses o a través de sistemas de canales.
- Implementar técnicas de recarga de acuíferos para mantener los niveles de agua subterránea, beneficiando indirectamente a la generación hidroeléctrica. Por ejemplo, en algunas regiones los acuíferos pueden alimentar ríos y arroyos a través de flujos de base (el aporte continuo de agua subterránea a los ríos). La recarga de estos acuíferos puede ayudar a mantener o aumentar los flujos de base, lo que a su vez puede contribuir a un caudal más constante en ríos utilizados para la generación hidroeléctrica. Otro ejemplo ocurre en las zonas donde el agua subterránea se utiliza para la irrigación o el consumo humano: una gestión eficaz de los acuíferos (incluida la recarga artificial) puede reducir la dependencia de las fuentes superficiales de agua. Esto puede dejar más agua disponible en los ríos para la generación de energía hidroeléctrica, especialmente en tiempos de sequía.
  - Utilizar excedentes de agua para recargar acuíferos a través de pozos de inyección, donde el agua se bombea directamente al acuífero.
  - Crear áreas de infiltración, como estanques o zanjas, donde el agua se acumula y se infiltra lentamente en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos.
- Implementar una planificación y políticas integrales de gestión de recursos hídricos que coordinen el almacenamiento, distribución y uso del agua entre diferentes sectores y usuarios.
  - Promover el uso eficiente del agua en todos los sectores, reduciendo la presión sobre los recursos hídricos, lo que implica desarrollar e implementar políticas y regulaciones que apoyen la adaptación y el manejo sostenible del agua.
  - Fomentar la colaboración entre diferentes usuarios del agua (agricultura, energía, industria, consumo humano) para una gestión integrada y sostenible.





- Participación comunitaria: involucrar a las comunidades locales en la gestión del agua y la toma de decisiones, garantizando que sus necesidades y preocupaciones sean consideradas.

#### 7.1.1.3. Costo-Efectividad

Se debe analizar cómo los costos iniciales y de mantenimiento de las mejoras o nuevas construcciones se comparan con los beneficios a largo plazo que estas inversiones pueden proporcionar en términos de estabilidad y eficiencia del sistema, dado que invertir en la modernización de las presas existentes, incluyendo el refuerzo estructural y la implementación de tecnologías más avanzadas para el control y la gestión del agua, así como construir nuevos embalses puede resultar en inversiones muy cuantiosas.

#### 7.1.1.4. Impacto en vulnerabilidad y resiliencia.

El impacto en la vulnerabilidad y la resiliencia en el contexto de la generación hidroeléctrica, especialmente en relación con el aumento de la capacidad de adaptación a variaciones hidrológicas, se centra en cómo las mejoras en infraestructura y gestión pueden hacer que las instalaciones hidroeléctricas sean más resistentes y adaptables a los cambios y fluctuaciones en la disponibilidad del agua.

- Resiliencia ante variaciones hidrológicas
  - Ampliar la capacidad de los embalses permite almacenar más agua durante períodos de abundancia, lo que puede ser crucial durante las épocas de sequía.
  - Modernizar las instalaciones para que puedan operar eficientemente en un rango más amplio de condiciones hidrológicas, adaptándose a cambios en los caudales de agua.
- Reducción de la vulnerabilidad
  - Mejorar la robustez de presas y embalses para resistir eventos extremos como inundaciones y sequías prolongadas.
  - Implementar tecnologías de monitoreo y sistemas de control para prevenir y mitigar rápidamente los efectos de eventos hidrológicos adversos.
- Gestión eficiente del agua
  - Utilizar modelos hidrológicos avanzados para anticipar variaciones en la disponibilidad del agua y planificar el uso y almacenamiento del agua de manera más eficiente.
  - Coordinar el uso de diferentes fuentes de agua, incluyendo aguas subterráneas y superficiales, para optimizar la disponibilidad del recurso hídrico.
- Adaptación al cambio climático



- Considerar proyecciones de cambio climático en la planificación y el diseño de infraestructuras, asegurando que puedan adaptarse a posibles futuros cambios en los patrones de precipitación y temperatura.
- Medidas de conservación y eficiencia
  - Implementar prácticas de conservación del agua y mejorar la eficiencia en el uso del recurso para minimizar los impactos durante los períodos de escasez.
- Participación y colaboración multisectorial
  - Trabajar conjuntamente con otros sectores que dependen del agua, como la agricultura y el suministro sanitario de agua, para una gestión integrada del recurso hídrico.
  - Incluir a las comunidades locales en la planificación y gestión del agua, promoviendo un enfoque participativo y transparente.

#### *7.1.1.5. Pros y contras*

En el ámbito de la generación hidroeléctrica, la consideración de pros y contras se centra en gran medida en la relación entre la inversión inicial y los beneficios a largo plazo. Esta dinámica es clave para evaluar la viabilidad y la sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos.

Los principales pros son los siguientes:

- La modernización y el reforzamiento de las presas y sistemas de control pueden aumentar significativamente la resiliencia de las instalaciones hidroeléctricas frente a eventos climáticos extremos, como inundaciones y sequías, asegurando una operación continua y reduciendo el riesgo de fallas catastróficas.
- La implementación de tecnologías avanzadas para la gestión del agua y la optimización de las operaciones puede llevar a un uso más eficiente de los recursos hídricos, mejorando la eficiencia en la generación de energía.
- Una gestión mejorada del agua y la adopción de prácticas sostenibles pueden ayudar a minimizar los impactos ambientales asociados con la generación hidroeléctrica, como la alteración de ecosistemas acuáticos y la emisión de gases de efecto invernadero.

Por su parte, las principales desventajas son las siguientes:

- La modernización de infraestructura y la implementación de nuevas tecnologías requieren una inversión inicial significativa. Esto puede ser un desafío, especialmente para operadores con recursos financieros limitados o en regiones con restricciones económicas.



- Las mejoras en la infraestructura y los sistemas pueden requerir periodos de construcción y desarrollo durante los cuales la operación normal de las plantas puede verse interrumpida, afectando la producción de energía.
- La adopción de tecnologías avanzadas y la implementación de sistemas de gestión más complejos pueden requerir personal con mayor capacitación y experiencia, así como cambios en los procesos operativos existentes.

### 7.1.2. Generación Solar

En el contexto de la energía solar, fuente energética de creciente expansión en Chile, el cambio climático presenta tanto desafíos como oportunidades. Las variaciones en la nubosidad y el aumento de las temperaturas pueden influir significativamente en la eficiencia de los paneles solares y, por ende, en la capacidad de generación de energía. Ante esta realidad, es esencial desarrollar estrategias que no solo mitiguen los efectos adversos del cambio climático, sino que también aprovechen sus potenciales beneficios. Las siguientes propuestas están orientadas a mejorar la eficiencia y adaptabilidad de la generación solar, mediante la implementación de tecnologías avanzadas que minimicen la pérdida de eficiencia debido a temperaturas más altas, y la diversificación de ubicaciones para optimizar la captación solar en diferentes condiciones climáticas. Estas medidas buscan asegurar que el sector solar chileno no solo se mantenga resiliente frente a los desafíos climáticos, sino que también maximice su potencial en un escenario de cambio constante.

#### 7.1.2.1. Tipo de evento

En la generación solar, los eventos clave relacionados con el cambio climático son la variabilidad en la nubosidad y las fluctuaciones de temperatura. La variabilidad en la nubosidad afecta directamente la cantidad de radiación solar que alcanza los paneles, lo cual puede llevar a una producción energética inconsistente y menos predecible. Un aumento en la frecuencia de días nublados puede disminuir significativamente la eficiencia de los sistemas solares, y por el contrario, una reducción de la nubosidad podría incrementar la generación de energía. Por otro lado, las temperaturas más altas, aunque parezcan favorables para la generación solar, en realidad pueden reducir la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. A medida que la temperatura aumenta, la eficiencia de conversión de los paneles disminuye, lo que resulta en una menor producción de energía eléctrica por cada unidad de radiación solar recibida.



### 7.1.2.2. Medidas propuestas

#### 7.1.2.2.1. Generación fotovoltaica

- Implementar paneles solares con tecnología que minimice la pérdida de eficiencia debido a temperaturas más altas. Esto dado que la eficiencia de los paneles solares puede verse afectada negativamente por temperaturas elevadas. Para mitigar este problema y mejorar el rendimiento de los paneles solares en condiciones de alta temperatura, se han desarrollado diversas tecnologías y estrategias.
  - Materiales de alta eficiencia térmica
    - Utilizar materiales como las células de perovskita o células solares de silicio monocristalino que mantienen una mayor eficiencia a altas temperaturas.
    - Aplicar recubrimientos que reflejen más luz infrarroja (calor) mientras permiten el paso de la luz visible para reducir el calentamiento del panel.
  - Tecnología de refrigeración de paneles
    - Diseñar los paneles con sistemas de refrigeración pasiva, como aletas de disipación de calor o materiales que disipan el calor de manera más eficiente.
    - Integrar sistemas de refrigeración activa, como el uso de fluidos para llevar el calor lejos de los paneles, manteniendo así una temperatura operativa más baja.
  - Diseño estructural mejorado
    - Diseñar la instalación de los paneles con suficiente espacio y ventilación para permitir que el aire circule libremente y disipe el calor.
    - Elevar los paneles del suelo o de la superficie del techo para mejorar la circulación de aire y la disipación de calor.
  - Usar células solares concentradoras que emplean lentes o espejos para concentrar la luz solar en una pequeña área de células fotovoltaicas de alta eficiencia. Estos sistemas suelen incluir métodos de enfriamiento para manejar el calor concentrado.
  - Integración con sistemas de enfriamiento de agua (Paneles Solares Fotovoltaicos-Térmicos PV-T), en donde el agua circula a través de un intercambiador de calor integrado para enfriar los paneles mientras se calienta para su uso en aplicaciones de agua caliente.
  - Implementar sistemas de monitoreo y control que ajusten activamente las condiciones de operación de los paneles para optimizar la eficiencia en respuesta a las variaciones de temperatura.



- Desarrollar proyectos solares en diversas regiones para mitigar los impactos de los cambios locales en nubosidad, esto es, instalar paneles solares en múltiples ubicaciones para equilibrar las diferencias en la radiación solar y las condiciones meteorológicas.

#### 7.1.2.2. Energía termosolar de concentración (CSP, por sus siglas en inglés)

- Una de las ventajas de la CSP es su capacidad para almacenar energía térmica, lo que permite la generación de electricidad incluso cuando no hay sol. En este sentido, optimizar el almacenamiento de calor puede mejorar la capacidad de la planta para proporcionar energía de manera constante. Esto se logra utilizando, por ejemplo, sales fundidas de bajo punto de fusión y con capacidad de mantenerse líquidas a altas temperaturas, como la “sal solar” (nitrato de sodio mezclado con nitrato de potasio) o el nitrato de calcio, el almacenamiento en concreto, entre otras.
- Implementar sistemas de refrigeración eficientes para los espejos y los receptores, dado que el rendimiento de la CSP, al igual que los paneles fotovoltaicos, puede disminuir con temperaturas extremas.
- En áreas con alta acumulación de polvo o partículas, como es el caso del Desierto de Atacama, sistemas de limpieza automatizados pueden mantener la eficiencia de los espejos y lentes utilizados para concentrar la luz solar.
- Utilizar recubrimientos especiales para proteger y mantener la eficiencia de las superficies reflectantes y ópticas, tales como recubrimientos anti-reflectantes (por ejemplo, dióxido de silicio o dióxido de titanio), recubrimientos hidrofóbicos e hidrofílicos, recubrimientos reflectantes (como los de plata y aluminio, usados para maximizar la reflectividad y eficiencia en la concentración de la luz solar), recubrimientos resistentes a la abrasión (como el nitruro de silicio), etc.
- Elegir ubicaciones no solo basadas en la disponibilidad solar, sino también considerando factores como la temperatura ambiente y la accesibilidad para el mantenimiento.
- Considerar diseños modulares que permitan la expansión o adaptación de la planta a cambios en la demanda o en las condiciones ambientales. Esto significa que las plantas CSP se construyan de tal manera que pueden ser fácilmente ampliadas, modificadas o adaptadas en respuesta a cambios en las necesidades energéticas o en el entorno operativo. Por ejemplo, que el diseño permita añadir más espejos, módulos de almacenamiento térmico o turbinas a medida que aumenta la demanda de energía, o bien incorporar nuevas tecnologías o mejoras en componentes específicos sin necesidad de rediseñar o reconstruir toda la instalación.
- Integrar CSP con sistemas fotovoltaicos puede proporcionar una generación de energía más equilibrada y constante. Al combinar paneles fotovoltaicos, que son efectivos durante el día,



con CSP, que puede almacenar y liberar energía, se puede lograr una generación de energía más constante a lo largo del día y la noche. Los paneles fotovoltaicos, por ejemplo, se pueden instalar en las áreas entre los espejos o helióstatos de las plantas CSP para aprovechar al máximo el terreno disponible, pudiendo además compartir infraestructura, como conexiones a la red eléctrica y equipos de control.

#### *7.1.2.3. Costo-Efectividad*

Se debe evaluar si el costo adicional de implementar tecnologías más sofisticadas se justifica por el aumento en la eficiencia y la producción de energía que proporcionan. Por ejemplo, los paneles solares de última generación, como aquellos basados en silicio monocristalino o tecnologías emergentes como las células de perovskita, suelen tener una eficiencia mayor. Sin embargo, también son más costosos.

#### *7.1.2.4. Impacto en vulnerabilidad y resiliencia*

El impacto buscado es la mejora en la consistencia del rendimiento de la generación solar. En el contexto de la generación de energía solar, consistencia se refiere a la capacidad de los sistemas solares para producir energía de manera fiable y predecible a lo largo del tiempo. Implica mantener un nivel de rendimiento que fluctúe lo mínimo posible a pesar de las variaciones ambientales o climáticas.

Esto incluye la adopción de tecnologías avanzadas en paneles solares que mantengan altas eficiencias incluso bajo condiciones de temperatura elevada o variabilidad en la luz solar. Además, la diversificación geográfica de las instalaciones solares puede mitigar los riesgos asociados a las variaciones climáticas locales, asegurando así que la disminución en la generación de energía en una región pueda ser compensada por una mayor producción en otra. Estas medidas, en conjunto con sistemas de monitoreo y gestión inteligente, pueden incrementar significativamente la resiliencia del sistema solar, permitiendo una adaptación más efectiva a las condiciones cambiantes y asegurando una entrega de energía más constante y fiable.

#### *7.1.2.5. Pros y contras*

En el contexto de la energía solar, el uso de tecnologías avanzadas presenta una serie de pros y contras que son muy importantes para evaluar al considerar el desarrollo y la expansión de proyectos solares. Uno de los principales desafíos es el mayor costo inicial asociado con estas tecnologías de vanguardia, pero este debe ser ponderado contra los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia y adaptabilidad.

Entre los principales pros se encuentran:



- Las tecnologías solares avanzadas, como paneles fotovoltaicos de alta eficiencia o sistemas de concentración solar con capacidades mejoradas de almacenamiento térmico, suelen tener mayores tasas de conversión de energía. Esto significa que pueden generar más electricidad a partir de la misma cantidad de luz solar, lo que es especialmente valioso en áreas con espacio limitado para instalaciones.
- Algunas tecnologías avanzadas están diseñadas para ser más resistentes y eficientes en condiciones ambientales variadas, como altas temperaturas o niveles fluctuantes de irradiación solar. Esto las hace más adaptables y fiables en diferentes climas y condiciones geográficas.
- La integración de soluciones de almacenamiento de energía avanzadas permite una mayor flexibilidad en la gestión de la producción de energía solar, facilitando el uso de esta energía durante períodos de baja irradiación solar. Por ejemplo, en los sistemas fotovoltaicos, el almacenamiento de energía se puede realizar especialmente con baterías, lo cual es muy relevante para gestionar la variabilidad en la producción de energía solar y para proporcionar electricidad durante la noche o en días nublados.

Por su parte, entre las principales contras se tienen:

- La implementación de tecnologías solares avanzadas suele requerir una inversión inicial significativa. Los costos más altos se deben a la investigación y desarrollo detrás de estas tecnologías, así como a la utilización de materiales más costosos o procesos de fabricación más complejos.
- Aunque estas tecnologías pueden ofrecer ahorros y beneficios a largo plazo, el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial puede ser un factor disuasivo para algunos inversores, especialmente en mercados donde los incentivos o subsidios para energías renovables son limitados.
- La instalación, operación y mantenimiento de tecnologías solares avanzadas pueden requerir conocimientos técnicos especializados y una infraestructura más compleja, lo cual incrementará aún más los costos, requiriendo de personal altamente especializado.

### 7.1.3. Generación Eólica

La energía eólica se enfrenta a desafíos únicos en el contexto del cambio climático. Las variaciones en los patrones de viento, exacerbadas por el cambio climático, requieren una respuesta adaptativa para asegurar una generación de energía eficiente y confiable. En este escenario, la resiliencia y la capacidad de adaptación de la infraestructura eólica son fundamentales para mantener la estabilidad y la sostenibilidad del suministro energético. Las medidas de adaptación propuestas en esta sección se



centran en mejorar la capacidad de las instalaciones eólicas para responder a estos desafíos climáticos, optimizando así su rendimiento y contribuyendo a la seguridad energética a largo plazo.

Estas medidas incluyen la implementación de tecnologías avanzadas en turbinas eólicas, la utilización de modelos climáticos para una planificación eficaz y la inversión en investigación y desarrollo para anticipar y adaptarse a los cambios en los patrones de viento. Además, se exploran estrategias para mejorar la integración de la energía eólica en la red eléctrica, garantizando así su eficacia como fuente de energía renovable en un mundo en rápida evolución. Estas propuestas buscan no solo incrementar la resiliencia frente al cambio climático, sino también mejorar la eficiencia y la viabilidad económica de la energía eólica, contribuyendo significativamente a un futuro energético más sostenible.

#### *7.1.3.1. Tipo de Evento*

En la generación de energía eólica, las variaciones en los patrones de viento son un factor crítico que impacta directamente en la eficiencia y la fiabilidad de esta fuente de energía. El viento, como recurso natural, es inherentemente variable y puede ser influenciado significativamente por el cambio climático, lo que altera los patrones meteorológicos globales y regionales.

Específicamente, el cambio climático puede causar cambios en la intensidad y dirección de los vientos predominantes. Esto se debe a la alteración de los sistemas meteorológicos a gran escala, como los patrones de alta y baja presión, que son influenciados por la temperatura global y las variaciones en la distribución de calor en la atmósfera. En algunas partes, esto puede resultar en vientos más fuertes y consistentes, mientras que, en otras, puede llevar a una disminución en la velocidad del viento, afectando negativamente la generación de energía eólica. Además, los cambios en los patrones climáticos pueden también hacer más impredecibles los patrones de viento y alterar las tendencias estacionales. Esto dificulta la planificación y la previsión de la generación de energía eólica, lo que es un desafío para la gestión de la red eléctrica y la planificación energética.

#### *7.1.3.2. Medidas propuestas*

La primera medida propuesta es la utilización de modelos climáticos avanzados para predecir cambios en los patrones de viento y planificar la ubicación de nuevos proyectos eólicos es una medida muy importante en el desarrollo de la energía eólica, especialmente en el contexto del cambio climático. Esta estrategia implica varios aspectos clave:

- Modelado climático y análisis de datos
  - Los modelos climáticos avanzados utilizan una amplia gama de datos, incluyendo registros históricos y proyecciones futuras, para entender cómo los patrones de viento





- podrían cambiar. Esto incluye datos sobre velocidades y direcciones del viento, frecuencia de eventos extremos (como tormentas o calmas prolongadas), y tendencias estacionales o a largo plazo.
- Los modelos de alta resolución pueden proporcionar información detallada sobre las condiciones de viento a nivel local y regional, lo cual es crucial para identificar los sitios más adecuados para el desarrollo eólico.
  - Planificación y selección de sitios
    - Mediante el modelado climático, los desarrolladores pueden identificar áreas con los patrones de viento más favorables, lo que aumenta la eficiencia y la rentabilidad de los proyectos eólicos.
    - Los modelos también ayudan a evaluar los riesgos asociados con la variabilidad del viento y los posibles impactos del cambio climático, permitiendo una mejor planificación a largo plazo y la implementación de estrategias de mitigación.
  - Adaptación a cambios futuros
    - Con un mejor entendimiento de cómo los patrones de viento podrían cambiar en el futuro, los proyectos eólicos pueden diseñarse para ser flexibles y adaptables. Esto puede incluir la selección de turbinas que sean eficientes en un rango más amplio de condiciones de viento o la planificación de la expansión futura del parque eólico.
    - Los datos de los modelos climáticos también pueden informar estrategias operativas y de mantenimiento, optimizando así la producción de energía y minimizando los costos a lo largo del tiempo.
  - Integración con la red eléctrica
    - La información obtenida de los modelos climáticos ayuda a los operadores de la red a planificar la integración de la energía eólica, anticipando variaciones en la producción y asegurando un suministro de energía estable.

La inversión en turbinas eólicas adaptables, que pueden operar eficientemente en un rango más amplio de condiciones de viento, es otra medida para mejorar la resiliencia y eficiencia de la generación de energía eólica. Esta estrategia se centra en la utilización de tecnologías avanzadas y diseños innovadores que permiten a las turbinas ajustarse a variaciones significativas en la velocidad y dirección del viento. Algunos aspectos clave de esta medida son los siguientes:

- Diseño de turbinas versátiles
  - Las turbinas modernas suelen estar equipadas con palas que pueden ajustar su ángulo (pitch) para optimizar la captura de energía en diferentes velocidades de viento. Esto permite que las turbinas sean eficientes tanto en vientos bajos como en vientos fuertes.



- Los sistemas de control avanzados permiten ajustes automáticos y en tiempo real de las palas y la orientación de la turbina (yaw), maximizando así la eficiencia en una amplia gama de condiciones eólicas.
- Eficiencia en diversas condiciones de viento
  - Las turbinas diseñadas para operar eficientemente en bajas velocidades de viento pueden capturar energía en condiciones donde las turbinas tradicionales podrían no ser efectivas.
  - Al mismo tiempo, la capacidad de las turbinas para soportar y operar en condiciones de vientos fuertes sin sufrir daños o necesidad de apagado es crucial para su fiabilidad y longevidad.
- Mejora en la captura de energía
  - El desarrollo continuo en el diseño de las palas eólicas, incluyendo materiales más ligeros y aerodinámicos, contribuye a una mayor eficiencia en la captura de energía del viento.
  - Turbinas construidas en torres más altas pueden acceder a corrientes de aire más fuertes y constantes a mayores altitudes, aumentando así la producción energética.
- Consideraciones de costos y rendimiento
  - Aunque las turbinas adaptables pueden ser más costosas inicialmente, su capacidad para operar eficientemente en una gama más amplia de condiciones puede resultar en un mayor rendimiento energético y un retorno de inversión más rápido.
  - La capacidad de adaptarse a diferentes condiciones de viento también puede significar menos tiempo de inactividad y, por lo tanto, una mayor producción de energía a lo largo del tiempo.
- Adaptación al cambio climático
  - Al ser capaces de adaptarse a un amplio espectro de condiciones eólicas, estas turbinas están mejor equipadas para enfrentar los desafíos presentados por el cambio climático, como la variabilidad en los patrones de viento.

### *7.1.3.3. Costo-Efectividad*

Nuevamente, la consideración de costo-efectividad está relacionada con el balance entre la inversión en tecnología y la optimización de la generación de energía. Este balance implica evaluar cómo la inversión en tecnologías avanzadas para turbinas eólicas y sistemas de gestión puede traducirse en mejoras significativas en la producción de energía y en la eficiencia operativa.

- Inversión en tecnología avanzada



- La adquisición de turbinas eólicas que pueden operar eficientemente en un rango más amplio de condiciones de viento representa una inversión significativa. Estas turbinas incorporan tecnologías de vanguardia en diseño aerodinámico, materiales, y sistemas de control.
- Invertir en sistemas avanzados de monitoreo y análisis de datos permite una gestión más precisa y proactiva de las operaciones eólicas, lo que puede aumentar la eficiencia y reducir los costos de mantenimiento.
- Optimización de la generación de energía
  - Las turbinas más avanzadas y eficientes pueden capturar más energía del viento, incluso en condiciones menos ideales, lo que aumenta la producción total de energía.
  - La tecnología avanzada puede disminuir el tiempo de inactividad debido a mantenimiento o a condiciones de viento desfavorables, asegurando una generación de energía más consistente.
- Evaluación de costo-efectividad
  - Es fundamental calcular el tiempo que tomará para que el aumento en la generación de energía y la reducción de costos operativos compensen la inversión inicial en tecnología avanzada.
  - Las turbinas eólicas de alta calidad y los sistemas de gestión eficientes pueden tener una mayor vida útil y menores necesidades de mantenimiento a largo plazo, lo que contribuye a un mejor retorno de la inversión a lo largo del tiempo.

#### 7.1.3.4. Impacto en Vulnerabilidad y Resiliencia

La mejora en la capacidad de adaptación a cambios en los patrones de viento es un aspecto crítico para asegurar la eficiencia y sostenibilidad a largo plazo de esta fuente de energía. Esta capacidad de adaptación es esencial debido a la naturaleza intrínsecamente variable del viento, que se ve aún más afectada por el cambio climático. A continuación, se detallan cómo estas medidas pueden mejorar la resiliencia de los proyectos eólicos.

- Adaptación a la variabilidad del viento
  - La inversión en turbinas eólicas que pueden operar eficientemente en un rango más amplio de condiciones de viento es clave para adaptarse a esta variabilidad. Turbinas con palas ajustables, sistemas de control avanzados y diseños aerodinámicos optimizados pueden capturar energía de manera más efectiva, incluso con variaciones significativas en la velocidad y dirección del viento.
  - Utilizar modelos climáticos y meteorológicos avanzados para predecir cambios en los patrones de viento permite a los operadores de parques eólicos ajustar sus estrategias



de operación y mantenimiento, optimizando así la producción de energía y reduciendo los riesgos asociados con la variabilidad del viento.

- Incremento de la resiliencia operativa
  - La capacidad de ajustar rápidamente las operaciones en respuesta a los cambios en los patrones de viento mejora la resiliencia de los parques eólicos. Esto incluye la capacidad de modificar la orientación de las turbinas, el ángulo de las palas y otros parámetros operativos en tiempo real.
  - Construir infraestructuras que puedan soportar condiciones extremas, como vientos fuertes y tormentas, es crucial para prevenir daños y garantizar la continuidad de la operación.

#### *7.1.3.5. Pros y Contras*

Las medidas propuestas para la generación de energía eólica, centradas en la adaptación a los cambios en los patrones de viento y la inversión en tecnologías avanzadas de turbinas, presentan varios pros y contras que deben ser evaluados. Estos se relacionan principalmente con la necesidad de inversión en investigación y desarrollo (I+D) y los beneficios a largo plazo en términos de fiabilidad y eficiencia.

Algunos pros de las medidas propuestas son:

- La inversión en I+D conduce a la creación de turbinas eólicas más avanzadas y adaptables, capaces de operar eficientemente en una gama más amplia de condiciones de viento. Esto se traduce en una mayor fiabilidad y una producción de energía más constante y predecible.
- Las tecnologías avanzadas pueden disminuir los riesgos asociados con la variabilidad del viento y los eventos climáticos extremos, lo que resulta en menos interrupciones operativas y una vida útil más larga de los equipos.
- A medida que la tecnología eólica avanza, los costos de generación tenderán a disminuir, haciéndola más competitiva en comparación con otras fuentes de energía. Esto puede impulsar una mayor adopción de la energía eólica, beneficiando tanto a la economía como al medio ambiente.

Respecto a las contras de las medidas propuestas, algunas son:

- El desarrollo de tecnologías eólicas avanzadas requiere una inversión significativa en investigación y desarrollo. Esto puede ser un desafío, especialmente para empresas o gobiernos con recursos financieros limitados.



- Las innovaciones en tecnología eólica no son inmediatas; hay un período de tiempo desde la investigación y desarrollo hasta la implementación y operación efectiva. Durante este tiempo, pueden surgir desafíos tecnológicos y financieros.
- La operación y mantenimiento de turbinas eólicas avanzadas pueden requerir personal altamente calificado y capacitado, lo que implica inversiones adicionales en formación y desarrollo de habilidades.

#### 7.1.4. Generación Convencional y Térmica

En el ámbito de la generación convencional y térmica de energía, las crecientes preocupaciones derivadas del cambio climático y la frecuencia de eventos climáticos extremos plantean retos significativos que requieren medidas estratégicas y adaptativas. Las plantas de generación que utilizan combustibles fósiles y otras tecnologías térmicas, si bien van en retirada, al menos en Chile, son uno de los pilares de la seguridad del sistema y también enfrentan ahora la urgente necesidad de fortalecer su resiliencia y adaptarse a un entorno en rápida evolución. Esta sección se enfoca en abordar estas preocupaciones, proponiendo medidas destinadas a mejorar la capacidad de estas instalaciones para resistir y recuperarse de eventos extremos, como inundaciones, olas de calor e incendios, que son cada vez más comunes y severos debido al cambio climático.

Las medidas abarcan desde el fortalecimiento de la infraestructura física hasta la optimización de los sistemas de enfriamiento y la implementación de planes de emergencia, las estrategias propuestas representan un esfuerzo integral para aumentar la seguridad, minimizar los riesgos operativos y ambientales, y asegurar que la generación convencional y térmica de energía opere de una manera correcta en el espacio temporal que existe en el marco de la transición energética.

##### 7.1.4.1. Tipo de Evento

La generación convencional y térmica de energía, que abarca desde plantas a carbón hasta plantas de gas natural y Diesel, se ve afectada significativamente por eventos climáticos extremos exacerbados por el cambio climático. Estos eventos, incluyendo olas de calor, inundaciones, entre otros, plantean desafíos que pueden comprometer la seguridad, eficiencia y continuidad operativa de estas instalaciones, así como llevar a un mayor consumo de combustibles fósiles y, por lo tanto, a mayor emisión de gases de efecto invernadero y contaminantes locales. A continuación, se detalla cómo cada uno de estos eventos impacta en la generación convencional y térmica de energía.



#### 7.1.4.1.1. Olas de Calor

- Las plantas de energía térmica dependen en gran medida de sistemas de refrigeración para mantener la eficiencia operativa. Durante las olas de calor, la temperatura elevada del aire y del agua puede disminuir la eficiencia de estos sistemas de refrigeración, reduciendo así la eficiencia general de la planta.
- Las altas temperaturas ambientales pueden aumentar el riesgo de sobrecalentamiento y fallo de equipos críticos, lo que puede conducir a paradas no planificadas o reducciones en la capacidad de generación.

#### 7.1.4.1.2. Inundaciones

- Las inundaciones representan un riesgo significativo para la infraestructura crítica de las plantas de energía, incluyendo tanto equipos eléctricos como mecánicos, y pueden provocar interrupciones prolongadas en su funcionamiento:
  - El agua de las inundaciones puede causar cortocircuitos en equipos eléctricos, como transformadores, generadores y paneles de control. Esto no solo puede provocar fallas inmediatas, sino también daños a largo plazo que requieren reparaciones o reemplazos costosos.
  - La presencia de agua en áreas con equipos eléctricos activos aumenta el riesgo de electrocución, lo que puede ser peligroso para el personal de la planta y complicar los esfuerzos de rescate y reparación. De hecho, podría obligar a las plantas de energía a detener las operaciones por razones de seguridad, lo que llevará a interrupciones en la generación de energía. Incluso después de que el agua retroceda, la evaluación de daños, las reparaciones y la limpieza pueden tomar un tiempo considerable, prolongando así las interrupciones en la generación de energía.
  - El agua de las inundaciones a menudo arrastra escombros que pueden obstruir o dañar físicamente partes mecánicas vitales de la planta.
  - El agua, especialmente si está contaminada o es salina, puede causar corrosión en componentes mecánicos como turbinas, bombas y tuberías. Esto puede reducir la vida útil de estos componentes y afectar su funcionamiento.
- Las inundaciones también pueden afectar la logística y el acceso a las plantas, dificultando las operaciones de mantenimiento y reparación.



#### *7.1.4.2. Medidas Propuestas*

Reforzar la infraestructura de las plantas de generación convencional y térmica para soportar condiciones climáticas extremas es una primera medida esencial para aumentar su resiliencia y asegurar la continuidad operativa. Esta estrategia implica una serie de acciones y mejoras destinadas a proteger las instalaciones contra los efectos adversos del cambio climático, como inundaciones, olas de calor y tormentas. A continuación, se detallan aspectos clave de esta medida:

- Fortalecimiento de estructuras físicas
  - Elevar equipos sensibles como generadores, transformadores y sistemas de control por encima de los niveles de inundación proyectados para evitar daños por agua.
  - Instalar barreras físicas, como diques y muros de contención, para proteger las instalaciones de las inundaciones.
  - Fortalecer edificios y estructuras para soportar vientos fuertes y cargas de impacto de escombros durante tormentas y huracanes.
- Mejoras en sistemas de refrigeración
  - Mejorar los sistemas de refrigeración para asegurar un rendimiento eficiente incluso durante olas de calor extremas, lo cual es crucial para prevenir el sobrecalentamiento de equipos.
  - Considerar sistemas de refrigeración que sean menos dependientes de las fuentes de agua externas, que pueden ser vulnerables durante sequías o contaminación del agua.
- Sistemas de drenaje y gestión de aguas pluviales
  - Asegurar que las instalaciones tengan una capacidad adecuada de drenaje para manejar grandes volúmenes de agua durante eventos de lluvia intensa.
  - Instalar o mejorar sistemas de bombeo para eliminar rápidamente el agua acumulada en áreas críticas.
- Redundancia y sistemas de respaldo
  - Implementar sistemas de energía de respaldo, como generadores, para asegurar la continuidad operativa durante interrupciones del suministro eléctrico.
  - Diseñar redundancia en componentes y sistemas críticos para asegurar que la planta pueda seguir operando si un componente falla o se daña.
- Planificación y preparación para emergencias
  - Desarrollar y practicar planes de emergencia para responder eficazmente a eventos climáticos extremos, incluyendo evacuaciones, cierres de seguridad y protocolos de recuperación post-evento.



Mejorar los sistemas de enfriamiento en las plantas de generación convencional y térmica para manejar aumentos de temperatura es otra medida importante, especialmente en el contexto del cambio climático, que trae consigo temperaturas más elevadas y olas de calor más frecuentes. Estas mejoras son esenciales para mantener la eficiencia operativa y prevenir el sobrecalentamiento de equipos críticos. A continuación, se detallan los aspectos clave de esta medida:

- Optimización de sistemas de enfriamiento existentes
  - Implementar tecnologías que mejoren la eficiencia de los sistemas de enfriamiento existentes, como intercambiadores de calor más eficientes o bombas y ventiladores optimizados.
  - Realizar un mantenimiento regular y una limpieza exhaustiva de los sistemas de enfriamiento para asegurar su funcionamiento óptimo y prevenir la acumulación de sedimentos o algas que puedan obstruir el flujo de agua o reducir la eficiencia del intercambio de calor.
- Implementación de sistemas de enfriamiento avanzados
  - En áreas donde los recursos hídricos son limitados o susceptibles a las sequías, considerar el uso de sistemas de enfriamiento por aire, como las torres de enfriamiento de circuito cerrado, que son menos dependientes del agua.
  - Utilizar sistemas de enfriamiento adiabático, que combinan los principios del enfriamiento por aire y agua, para mejorar la eficiencia en climas más cálidos y secos.
- Uso de aguas no convencionales
  - Explorar la posibilidad de usar aguas residuales tratadas para los sistemas de enfriamiento, lo cual puede ser una solución sostenible en regiones con escasez de agua dulce.
  - Para plantas ubicadas cerca de la costa, considerar el uso de agua de mar para el enfriamiento, aunque esto requiere sistemas resistentes a la corrosión.
- Sistemas de enfriamiento híbridos
  - Implementar sistemas de enfriamiento híbridos que combinan diferentes tecnologías, como enfriamiento por aire y agua, para maximizar la eficiencia y adaptabilidad en diferentes condiciones climáticas.
- Diseño y ubicación estratégicos
  - Diseñar y ubicar los sistemas de enfriamiento de manera que minimicen su exposición al calor ambiental y maximicen su eficiencia, por ejemplo, utilizando sombreado natural o construcción subterránea.





#### 7.1.4.3. Costo-Efectividad

La evaluación de costo-efectividad en términos de "costo de fortalecimiento infraestructural versus riesgos reducidos" para la generación convencional y térmica de energía implica una comparación detallada entre la inversión requerida para mejorar y fortalecer la infraestructura y los beneficios en términos de reducción de riesgos y aumento de la fiabilidad. Esta evaluación es fundamental para tomar decisiones informadas sobre dónde y cómo invertir recursos, especialmente en un contexto de cambio climático y eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes. A continuación, se detallan los elementos clave de esta evaluación.

- Evaluación del costo de fortalecimiento infraestructural
  - Estimar el costo de implementar mejoras en la infraestructura, que pueden incluir la construcción de barreras físicas contra inundaciones, la actualización de sistemas de enfriamiento, el refuerzo de estructuras para resistir tormentas y vientos fuertes, y la instalación de sistemas de energía de respaldo.
  - Considerar los costos adicionales a largo plazo asociados con el mantenimiento y operación de infraestructuras mejoradas y tecnologías avanzadas.
- Evaluación de riesgos reducidos
  - Calcular cómo las mejoras en la infraestructura pueden reducir la probabilidad y el impacto de interrupciones operativas causadas por eventos climáticos extremos.
  - Valorar cómo las inversiones en fortalecimiento pueden prolongar la vida útil de la infraestructura, evitando costos futuros de reparación o reconstrucción.
  - Considerar los beneficios intangibles pero cruciales en términos de seguridad operativa y confianza en la continuidad del suministro de energía.
- Balance entre costo y beneficio
  - Comparar el costo de las mejoras con los ahorros y beneficios a largo plazo, incluyendo la reducción de costos por interrupciones y reparaciones, y el valor de una operación más estable y confiable.
  - Tomar en cuenta cómo el cambio climático puede aumentar la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos en el futuro, lo que puede hacer que la inversión en fortalecimiento infraestructural sea más rentable a largo plazo.

#### 7.1.4.4. Impacto en Vulnerabilidad y Resiliencia

La reducción de la susceptibilidad a interrupciones y daños por eventos extremos implica implementar medidas que aumenten la capacidad de las plantas de energía para resistir, adaptarse y recuperarse



rápidamente de condiciones climáticas adversas, asegurando así la continuidad y fiabilidad de la generación de energía.

- Al fortalecer las infraestructuras y mejorar los sistemas de enfriamiento, las plantas son menos susceptibles a daños físicos causados por inundaciones, olas de calor o tormentas. Esto significa que hay menos probabilidad de interrupciones prolongadas o costosas reparaciones tras eventos extremos.
- Con sistemas de enfriamiento más eficientes y adaptados a temperaturas más altas, las plantas pueden mantener operaciones continuas y estables incluso durante olas de calor, reduciendo el riesgo de apagados forzados por sobrecalentamiento.
- La implementación de sistemas de respaldo y planes de emergencia permite una rápida recuperación y restauración de las operaciones después de eventos extremos, minimizando el tiempo de inactividad y asegurando un suministro de energía constante.
- Con la capacidad de adaptarse rápidamente a condiciones cambiantes y responder eficazmente a emergencias, las plantas se vuelven más resilientes y capaces de manejar desafíos inesperados.
- Al reducir la vulnerabilidad a eventos extremos, se garantiza una fuente de energía más segura y confiable para los consumidores, lo cual es crucial para las actividades económicas y la vida diaria.
- La inversión en medidas de resiliencia contribuye a la sostenibilidad a largo plazo de las plantas de energía, asegurando que puedan continuar operando eficientemente en un futuro marcado por el cambio climático.

#### *7.1.4.5. Pros y Contras*

Las medidas para fortalecer la resiliencia de la generación convencional y térmica de energía frente a eventos climáticos extremos presentan varios pros y contras que deben considerarse. Estas medidas incluyen el fortalecimiento de la infraestructura, la mejora de los sistemas de enfriamiento, y la implementación de sistemas de respaldo y planes de emergencia.

Los principales pros de las medidas son los siguientes:

- El fortalecimiento de la infraestructura y la mejora de los sistemas de enfriamiento aumentan la capacidad de las plantas para resistir y operar eficientemente durante eventos climáticos extremos, reduciendo el riesgo de interrupciones significativas.



- La implementación de sistemas de respaldo, como el almacenamiento, y planes de emergencia asegura una mayor continuidad operativa, incluso en condiciones adversas, lo que garantiza un suministro de energía más constante y fiable.
- Aunque implican una inversión inicial, estas medidas pueden reducir los costos a largo plazo al prevenir daños costosos y disminuir la frecuencia y duración de las interrupciones operativas.

Por otro lado, las principales contras de las medidas son las siguientes:

- El fortalecimiento de la infraestructura y la actualización de los sistemas de enfriamiento requieren una inversión significativa, lo que puede ser un obstáculo, especialmente para operadores con presupuestos limitados.
- Implementar estas mejoras puede ser técnicamente complejo y requerir una logística avanzada, así como la necesidad de personal especializado para el diseño, instalación y mantenimiento.
- El proceso de mejorar la infraestructura y los sistemas puede ser prolongado, durante el cual las operaciones normales podrían verse afectadas temporalmente.

## 7.2. Transmisión y distribución eléctrica

### 7.2.1. Tipo de Evento

En el contexto del cambio climático, la infraestructura de transmisión y distribución eléctrica enfrenta varios tipos de eventos que pueden afectar significativamente su operatividad y confiabilidad:

- Inundaciones y elevación del nivel del mar: pueden dañar subestaciones eléctricas, líneas de transmisión y otros componentes críticos de la infraestructura. El agua puede causar cortocircuitos y fallas en equipos eléctricos, y la corrosión acelerada de componentes.
- Tormentas y huracanes: los fuertes vientos y lluvias pueden derribar líneas de transmisión, postes y árboles, causando interrupciones extensas en el suministro de energía. Además, las tormentas pueden dañar los equipos y aumentar el riesgo de cortocircuitos.
- Acumulación de nieve y hielo: la nieve y el hielo pueden tener un impacto significativo en la infraestructura de transmisión y distribución eléctrica. La acumulación de nieve pesada o la formación de hielo en las líneas de transmisión y distribución pueden aumentar la carga sobre estos componentes, llevando a su deformación o incluso a su rotura. Además, el hielo puede causar *galloping* en las líneas de transmisión, un movimiento oscilante que puede provocar fallos mecánicos. Estas condiciones también dificultan el acceso para el mantenimiento y las reparaciones, lo que puede prolongar las interrupciones del servicio eléctrico.



- Olas de calor extremas: aumentan la demanda de energía, especialmente para refrigeración, poniendo a prueba la capacidad de la red eléctrica. El exceso de demanda puede llevar a sobrecargas y fallos en el sistema.
- Eventos relacionados con el frío extremo: aunque menos comunes en algunas regiones, las bajas temperaturas extremas y las tormentas de nieve pueden congelar equipos y líneas de transmisión, así como aumentar la demanda de calefacción, lo que desafía la capacidad y fiabilidad de la red.

### 7.2.2. Medidas Propuestas

Para la transmisión y distribución eléctrica, varias medidas pueden ser propuestas para aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático. Estas medidas incluyen:

- Mejorar la resistencia física de líneas de transmisión, torres, postes y subestaciones contra eventos climáticos extremos.
  - Mejorar la resistencia de torres, postes y subestaciones mediante el uso de materiales más duraderos y resistentes, así como el diseño y construcción que puedan soportar condiciones extremas como vientos fuertes, inundaciones y acumulación de nieve o hielo. Esto incluye el reforzamiento de las bases y anclajes, así como la optimización de la altura y la forma de las estructuras para reducir la vulnerabilidad ante vientos y cargas de hielo.
  - Utilizar tecnologías y materiales avanzados para las líneas de transmisión, como conductores de mayor capacidad y resistencia al calor, y aisladores más robustos para prevenir fallos durante eventos extremos. Estas mejoras pueden incluir también la implementación de líneas subterráneas en áreas particularmente vulnerables a eventos climáticos severos.
  - Adoptar enfoques innovadores en el diseño y construcción de la infraestructura eléctrica para mejorar su resiliencia. Esto puede incluir la utilización de diseños que distribuyan mejor las cargas estructurales en condiciones extremas y el empleo de tecnologías emergentes, como sensores y materiales avanzados, que pueden alertar sobre posibles fallos o deterioros. Además, el diseño debe considerar las tendencias futuras del clima para garantizar que la infraestructura sea resistente no solo a las condiciones climáticas actuales, sino también a los escenarios previstos de cambio climático.
- Considerar factores climáticos y ambientales en el diseño y la ubicación de nuevas infraestructuras y en la actualización de las existentes.



- Realizar análisis detallados de riesgos que incluyan la evaluación de patrones climáticos históricos y proyectados, zonas propensas a inundaciones, áreas con alta incidencia de tormentas u otras condiciones ambientales relevantes. Esto ayudará a identificar las ubicaciones más seguras y adecuadas para la infraestructura eléctrica y a diseñar medidas de protección específicas.
- Integrar consideraciones de cambio climático en el diseño de nuevas infraestructuras y en la actualización de las existentes, incluyendo la elección de materiales resistentes a condiciones climáticas extremas, la adaptabilidad a diferentes escenarios climáticos futuros y la implementación de soluciones de ingeniería que puedan mitigar los impactos de estos cambios, como el drenaje mejorado para áreas propensas a inundaciones o el aumento de la altura de las estructuras en zonas susceptibles a la elevación del nivel del mar.
- Elegir ubicaciones para nuevas instalaciones y redes que minimicen la exposición a riesgos climáticos y ambientales. Esto puede incluir evitar zonas de alto riesgo como áreas bajas propensas a inundaciones o regiones con alta frecuencia de eventos climáticos severos, y considerar la proximidad a áreas protegidas o ecosistemas sensibles para minimizar el impacto ambiental.
- Incorporar prácticas de construcción sostenible y respetuosa con el medio ambiente, asegurando que el diseño y ubicación de la infraestructura eléctrica no solo consideren la resistencia a eventos climáticos, sino también la conservación de hábitats locales y la biodiversidad. Esto incluye la utilización de corredores ecológicos y la minimización de la fragmentación del hábitat.
- Utilizar tecnologías avanzadas para el monitoreo en tiempo real de las condiciones climáticas y de la infraestructura.
  - Instalar una red de sensores avanzados a lo largo de la infraestructura de transmisión y distribución para monitorear en tiempo real diversas condiciones como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, y la presencia de hielo o nieve. Estos sensores pueden ayudar a detectar y prevenir problemas antes de que se conviertan en interrupciones, permitiendo una respuesta rápida a condiciones potencialmente peligrosas.
  - Utilizar SIG y Big Data para analizar y visualizar grandes cantidades de datos climáticos y de infraestructura. Esto permite una mejor comprensión y predicción de los impactos de eventos climáticos en la red eléctrica y facilita la toma de decisiones informadas para la gestión de riesgos, la planificación de mantenimiento y la respuesta a emergencias.



- Controlar la vegetación cerca de las líneas de transmisión y distribución y realizar un mantenimiento preventivo regular para reducir los riesgos de interrupciones.
  - Implementar programas regulares y sistemáticos de poda y manejo de la vegetación en las áreas circundantes a las líneas de transmisión y distribución. Esto incluye la identificación y el corte de árboles y ramas que puedan ser peligrosos, reduciendo así el riesgo de cortes de energía y daños a la infraestructura.
  - Establecer un cronograma de mantenimiento preventivo para inspeccionar y mantener la infraestructura de transmisión y distribución. Esto incluye la revisión regular de postes, torres, líneas y equipos asociados para detectar y reparar posibles problemas antes de que resulten en interrupciones del servicio. Las inspecciones pueden incluir el uso de tecnología avanzada, como drones y cámaras termográficas, para una evaluación más eficiente y detallada.
  - Emplear tecnologías como imágenes satelitales, LiDAR (Detección y Rango de Luz), y fotografía aérea para monitorear de manera efectiva y precisa el crecimiento y la proximidad de la vegetación a las líneas de transmisión y distribución. Estas tecnologías permiten realizar mapeos detallados y frecuentes, ayudando a identificar áreas que requieren intervención prioritaria.
  - Integrar la gestión de vegetación y el mantenimiento preventivo dentro de un marco de planificación basado en riesgos. Esto implica analizar datos históricos y tendencias para identificar áreas con mayor riesgo de caídas de árboles o fallos de infraestructura y priorizar las acciones de mantenimiento en estas zonas.
  - Capacitar al personal responsable del mantenimiento y la gestión de la vegetación sobre las mejores prácticas y técnicas seguras, y fomentar la concienciación entre las comunidades locales sobre la importancia de mantener la vegetación controlada cerca de las líneas eléctricas para prevenir interrupciones y garantizar la seguridad.
- Incorporar tecnologías inteligentes para mejorar la respuesta y la adaptación a las fluctuaciones de la demanda y a los desafíos operativos.
  - Utilizar tecnologías de Redes Eléctricas Inteligentes *smart grid* para mejorar la monitorización, control y comunicación en tiempo real a lo largo de la red eléctrica. Esto incluye el uso de sensores, medidores inteligentes, equipos de comunicación y software de análisis avanzado, permitiendo una gestión más dinámica y eficiente de la red.
  - Implementar sistemas de automatización en la red de distribución que puedan detectar y responder automáticamente a problemas como fluctuaciones de voltaje, sobrecargas o fallos en la línea. Esto mejora la confiabilidad de la red al permitir respuestas rápidas y localizadas a estos desafíos.



- Desarrollar e integrar tecnologías que permitan una respuesta activa a la demanda. Estos sistemas coordinan la reducción del consumo de energía entre los usuarios durante los picos de demanda, ayudando a estabilizar la red y evitando la necesidad de activar fuentes de generación de energía adicionales o menos eficientes.
- Aplicar soluciones de análisis de datos y aprendizaje automático para predecir patrones de demanda y optimizar la operación de la red. Esto puede incluir la predicción de picos de carga, la identificación temprana de posibles fallos y la optimización del flujo de energía.
- Fomentar la comunicación y la interoperabilidad entre diferentes componentes y sistemas de la red, facilitando una mejor coordinación y eficiencia. Esto es esencial para integrar con éxito una variedad de fuentes de energía distribuida y para gestionar de forma eficaz la demanda y la oferta de energía.
- Integrar infraestructura de recarga inteligente para vehículos eléctricos, que puede funcionar tanto como consumidores de energía como fuentes de almacenamiento de energía, contribuyendo a la estabilidad de la red durante diferentes períodos de demanda.
- Utilizar almacenamiento de energía y fuentes de energía distribuida para mejorar la resiliencia y flexibilidad de la red.
  - Instalar sistemas de almacenamiento de energía, como baterías de ion-litio o tecnologías de almacenamiento térmico, en puntos estratégicos de la red. Estos sistemas pueden almacenar energía durante períodos de baja demanda y liberarla durante picos de demanda o interrupciones, contribuyendo a estabilizar la red.
  - Fomentar y facilitar la integración de fuentes de energía distribuida, como paneles solares en tejados y pequeñas turbinas eólicas, en la red eléctrica. Las FED pueden proporcionar energía localmente, reduciendo la dependencia de la red centralizada y aumentando la resiliencia en caso de fallos en partes de la red.
  - Crear microrredes que puedan operar de manera autónoma o conectarse a la red principal según sea necesario. Las microrredes pueden aislar los fallos y mantener el suministro de energía en áreas específicas, incluso cuando la red principal experimenta interrupciones.
  - Utilizar tecnologías avanzadas para una gestión más eficiente de la demanda, incluyendo sistemas de respuesta a la demanda y contadores inteligentes. Esto permite una mejor coordinación entre la generación, el almacenamiento y el consumo de energía, mejorando la eficiencia y estabilidad de la red.
  - Nuevamente, cabe aquí mencionar que es necesario modernizar la red eléctrica con tecnologías de *smart grid* que permitan una mejor monitorización y control de la red,



- una rápida respuesta a cambios en la demanda o fallos del sistema, y una integración eficiente de fuentes de energía renovable y distribuida.
- Mejorar la interconexión y la capacidad de transferencia entre diferentes áreas de la red para permitir un flujo más eficiente de energía. Esto puede ayudar a balancear la carga y reducir el impacto de las interrupciones en áreas específicas.
  - Desarrollar y practicar planes de emergencia para responder de manera efectiva a los daños y fallas en la red.
    - Desarrollar planes de emergencia exhaustivos que aborden una variedad de escenarios posibles, incluyendo desastres naturales como huracanes, inundaciones y terremotos, así como fallas técnicas o ataques cibernéticos. Estos planes deben incluir procedimientos claros para la evaluación rápida de daños, la restauración del servicio, la comunicación con las partes interesadas y la movilización de recursos.
    - Realizar simulacros periódicos para practicar la respuesta a emergencias, lo que ayuda a garantizar que el personal esté bien capacitado y preparado para actuar eficientemente en situaciones reales. Estos simulacros deben incluir no solo a los empleados de la compañía eléctrica, sino también a los servicios de emergencia locales, autoridades gubernamentales y otros actores clave.
    - Coordinar estrechamente con los servicios de emergencia locales, regionales y nacionales para asegurar una respuesta integral y efectiva. Esto incluye compartir planes, participar en ejercicios de entrenamiento conjuntos y establecer líneas de comunicación claras.
    - Desarrollar estrategias de comunicación efectivas para mantener informados a los clientes y al público durante una emergencia. Esto puede incluir el uso de medios sociales, aplicaciones móviles, alertas por correo electrónico y mensajes de texto, así como la coordinación con los medios de comunicación locales para difundir información sobre el estado de la red y los esfuerzos de recuperación.
    - Asegurar que toda la infraestructura de TI crítica, incluyendo los sistemas de control de la red y las bases de datos, tengan respaldos robustos y planes de recuperación ante desastres para garantizar que la información esencial y los sistemas de control puedan ser rápidamente restaurados después de una interrupción.
    - Revisar y actualizar regularmente los planes de emergencia para reflejar los cambios en la infraestructura de la red, las nuevas amenazas y vulnerabilidades identificadas, y las lecciones aprendidas de ejercicios anteriores y situaciones de emergencia reales.





### 7.2.3. Costo-Efectividad

La evaluación de la costo-efectividad de las medidas propuestas para mejorar la resiliencia de la infraestructura de transmisión y distribución eléctrica frente al cambio climático implica considerar tanto los costos iniciales y operativos como los beneficios a largo plazo en términos de reducción de riesgos y mejora de la fiabilidad. A continuación, se detallan las implicancias de esta evaluación.

- Inversión inicial y costos operativos
  - Muchas de las medidas propuestas, como la modernización de la infraestructura y la implementación de tecnologías avanzadas, requieren una inversión inicial significativa. Esto incluye costos de materiales, mano de obra, tecnología y posibles interrupciones durante la instalación o actualización.
  - El mantenimiento regular, especialmente en tecnologías más avanzadas y sistemas de monitoreo, puede implicar costos operativos adicionales.
- Reducción de riesgos y mejora de la fiabilidad
  - Las mejoras en la infraestructura y en los sistemas de monitoreo pueden reducir significativamente la frecuencia y severidad de las interrupciones, lo que a su vez disminuye los costos asociados con las reparaciones y la pérdida de ingresos.
  - Reforzar la infraestructura y adoptar prácticas de mantenimiento preventivo puede extender la vida útil de los equipos y reducir la necesidad de reemplazos costosos.
- Análisis de retorno de inversión
  - Es importante nuevamente evaluar el retorno de la inversión al considerar los costos iniciales frente a los ahorros a largo plazo y los beneficios de una operación más fiable y segura.
  - Además de los beneficios financieros directos, hay beneficios intangibles como la mejora en la seguridad pública, la confianza del consumidor y la contribución a los objetivos de sostenibilidad.
- Impacto de los incentivos y políticas
  - Los incentivos y subvenciones gubernamentales, así como las políticas que favorecen las inversiones en infraestructura resiliente, pueden influir significativamente en la ecuación de costo-efectividad.

### 7.2.4. Impacto en Vulnerabilidad y Resiliencia

Las medidas propuestas para mejorar la infraestructura de transmisión y distribución eléctrica tienen un impacto significativo en la reducción de la vulnerabilidad y el aumento de la resiliencia frente a eventos



climáticos extremos y otros desafíos impuestos por el cambio climático. A continuación, se detalla cómo estas medidas afectan la vulnerabilidad y la resiliencia del sistema eléctrico.

- Reducción de la vulnerabilidad
  - El fortalecimiento de la infraestructura y la implementación de diseños más resistentes reducen el riesgo de daños físicos causados por inundaciones, tormentas, y otros eventos climáticos extremos.
  - Al mejorar la gestión de la vegetación y realizar un mantenimiento preventivo, se minimiza la probabilidad de cortes de energía y otros problemas operativos relacionados con la caída de árboles y el deterioro de equipos.
- Mejora de la resiliencia
  - La implementación de planes de emergencia y sistemas de monitoreo y alerta temprana permite una respuesta y recuperación más rápidas y efectivas ante eventos disruptivos, mejorando así la capacidad general de la red para recuperarse de interrupciones.
  - La integración de tecnologías inteligentes y sistemas de almacenamiento de energía proporciona una mayor flexibilidad y adaptabilidad en la gestión de la red, permitiendo una mejor respuesta a las fluctuaciones de demanda y a las variaciones en la generación de energía.
- Impactos socioeconómicos y ambientales
  - Al reducir la vulnerabilidad de la red y mejorar su resiliencia, se garantiza una mayor continuidad y fiabilidad en el suministro de energía, lo cual es crucial para actividades económicas, servicios esenciales y la vida cotidiana de las personas.
  - Al prevenir interrupciones y fallos, se contribuye a una operación más sostenible y eficiente de la red eléctrica, lo que a su vez puede ayudar a reducir los impactos ambientales asociados con la generación de energía de emergencia y la reparación de daños.

#### 7.2.5. Pros y Contras

Los principales pros de las medidas propuestas para mejorar la resiliencia de la infraestructura de transmisión y distribución eléctrica frente al cambio climático incluyen:

- Las mejoras en la infraestructura y la implementación de tecnologías avanzadas disminuyen la frecuencia y duración de las interrupciones del servicio eléctrico, asegurando un suministro más estable y confiable.



- Al reforzar la infraestructura y mejorar la gestión de la vegetación, se minimizan los riesgos de accidentes y daños a la propiedad, lo que mejora la seguridad general de la comunidad.
- La implementación de sistemas de monitoreo y gestión inteligente permite una gestión más eficiente y proactiva de la red, optimizando el mantenimiento y reduciendo los costos operativos.
- Las mejoras tecnológicas y los sistemas inteligentes ofrecen una mayor flexibilidad para adaptarse a futuras innovaciones tecnológicas y a cambios en los patrones de demanda y generación de energía.
- Al mejorar la eficiencia y reducir la frecuencia de interrupciones, se disminuye la necesidad de generación de energía de respaldo, lo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales.
- Aunque las mejoras en la infraestructura pueden requerir inversiones iniciales significativas, pueden resultar en ahorros considerables a largo plazo al evitar costosos daños y reparaciones y al mejorar la eficiencia operativa.

Por su parte, los principales contras de las medidas propuestas para mejorar la resiliencia de la infraestructura de transmisión y distribución eléctrica frente al cambio climático incluyen:

- Las mejoras en la infraestructura, la implementación de tecnologías avanzadas y la integración de sistemas inteligentes suelen requerir una inversión inicial considerable, lo que puede ser un desafío financiero, especialmente para las empresas o regiones con presupuestos limitados.
- La instalación de sistemas avanzados y la actualización de infraestructuras existentes pueden ser técnicamente complejas, requiriendo conocimientos especializados y a menudo resultando en interrupciones temporales durante el proceso de instalación o actualización.
- El mantenimiento regular de sistemas de monitoreo avanzados, redes inteligentes y otras tecnologías nuevas puede incurrir en costos operativos adicionales y requerir personal capacitado para su gestión y mantenimiento.
- La adopción de nuevas tecnologías y prácticas puede requerir una capacitación extensiva del personal y posibles cambios en la estructura organizativa y los procedimientos operativos.
- Existe el riesgo de que las tecnologías implementadas se vuelvan obsoletas rápidamente debido al rápido avance de la tecnología, lo que podría requerir actualizaciones o reemplazos frecuentes.
- Una mayor dependencia de sistemas automatizados y redes inteligentes puede aumentar la vulnerabilidad a fallos técnicos y ciberataques, lo que requiere medidas robustas de seguridad cibernética.



---

## 8. METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO, REPORTE, VERIFICACIÓN Y EVALUACIÓN (MRV+E)

---

Desarrollar una metodología para el Monitoreo, Reporte, Verificación y Evaluación (MRV+E) es muy importante para asegurar que las medidas de adaptación al cambio climático en la infraestructura energética de Chile sean efectivamente implementadas y sus impactos evaluados con precisión. La metodología debe incluir un conjunto de indicadores específicos para cada medida propuesta, permitiendo un seguimiento continuo a lo largo de las etapas de puesta en marcha, progreso y resultados. A continuación, se presenta un esquema general para esta metodología:

- Desarrollo de indicadores específicos para cada medida
  - Para cada medida de adaptación (por ejemplo, fortalecimiento de infraestructura, integración de tecnología inteligente, etc.), se deben desarrollar indicadores específicos que reflejen el progreso y la eficacia de la implementación.
  - Incluir tanto indicadores cuantitativos (como la cantidad de infraestructura mejorada, reducción en la frecuencia de interrupciones) como cualitativos (como la mejora en la percepción de seguridad y confiabilidad por parte de los usuarios).
- Etapas de implementación y monitoreo
  - Puesta en marcha: En esta fase inicial, los indicadores pueden centrarse en la preparación y despliegue de las medidas, como fondos asignados, proyectos planificados o en proceso, y capacitación del personal.
  - Progreso: En la etapa intermedia, los indicadores deben reflejar la implementación en curso y los logros a corto plazo, como infraestructura mejorada, sistemas instalados, y cambios iniciales en la operación y el rendimiento.
  - Resultados: En la etapa final, se evalúa el impacto a largo plazo de las medidas, como la reducción sostenida en interrupciones, mejoras en la eficiencia energética, y cumplimiento de objetivos de sostenibilidad y resiliencia.
- Metodología de reporte y verificación
  - Establecer un cronograma regular de reportes que documenten el avance en cada etapa para cada medida implementada.
  - Incluir procedimientos para la verificación independiente de los datos reportados, asegurando la precisión y transparencia de la información.
- Evaluación y ajuste continuo
  - Realizar evaluaciones periódicas para determinar la efectividad de las medidas y la precisión de los indicadores.



- Permitir ajustes en la estrategia de implementación basados en los resultados de las evaluaciones y cambios en el entorno operativo o climático.
- Consideraciones Temporales Específicas
  - Reconocer que cada etapa tiene su propio marco temporal y requerirá un enfoque específico en términos de monitoreo y evaluación.
- Incorporación de actores clave
  - Incluir en el proceso de MRV+E a los actores relevantes, como operadores de infraestructura, autoridades locales y comunidades afectadas, para obtener una visión integral del impacto de las medidas.

La metodología MRV+E debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a diferentes contextos y escalas de implementación, pero también lo suficientemente robusta para proporcionar datos fiables y significativos que informen la toma de decisiones y la planificación futura.



---

## REFERENCIAS CONSULTADAS

---

Allen, M., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., & Kainuma, M. (2018). Special Report: Global Warming of 1.5 C. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Dale, L., Carnall, M., Wei, M., Fitts, G., & McDonald, S. L. (2018). Assessing the impact of wildfires on the California electricity grid. California Energy Commission. CCCA4-CEC-2018-002, 1.

IEA (2022). Canada Electricity Security Policy <https://www.iea.org/articles/canada-electricity-security-policy-2>

Juliano, T. W., Jiménez, P. A., Kosović, B., Eidhammer, T., Thompson, G., Berg, L. K., ... & Polidori, A. (2022). Smoke from 2020 United States wildfires responsible for substantial solar energy forecast errors. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034010.

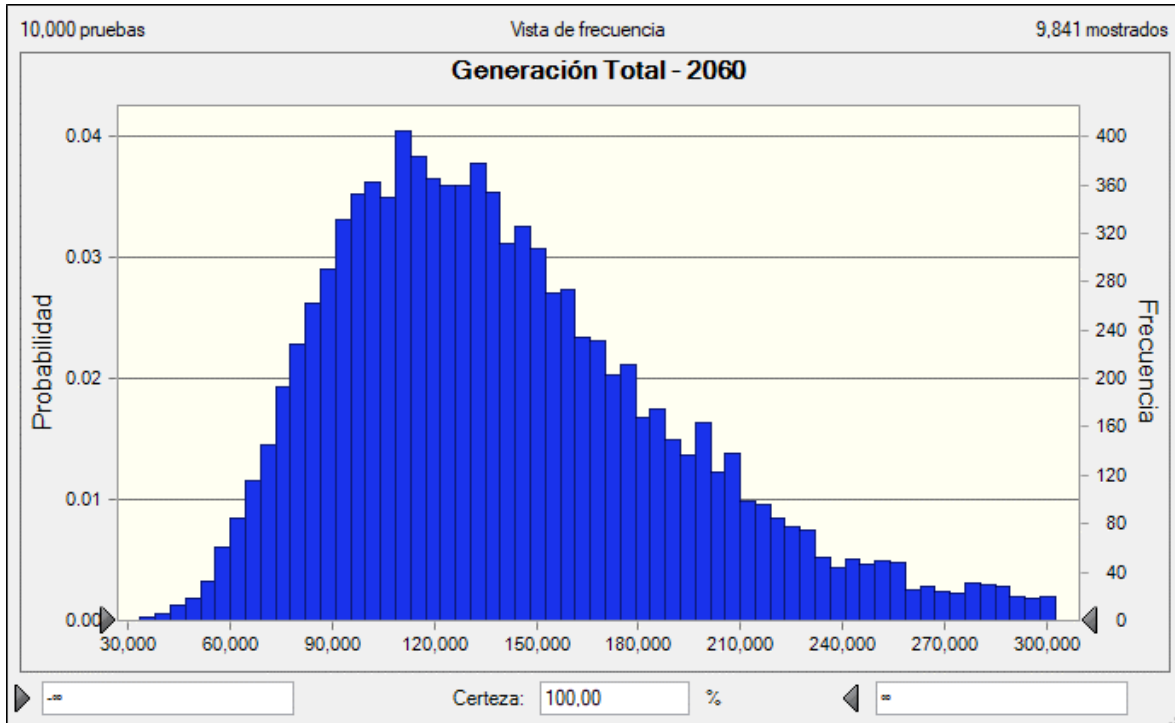
Massie, A., & Watson, N. R. (2011). Impact of the Christchurch earthquakes on the electrical power system infrastructure. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 425–430. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.44.4.425-430>

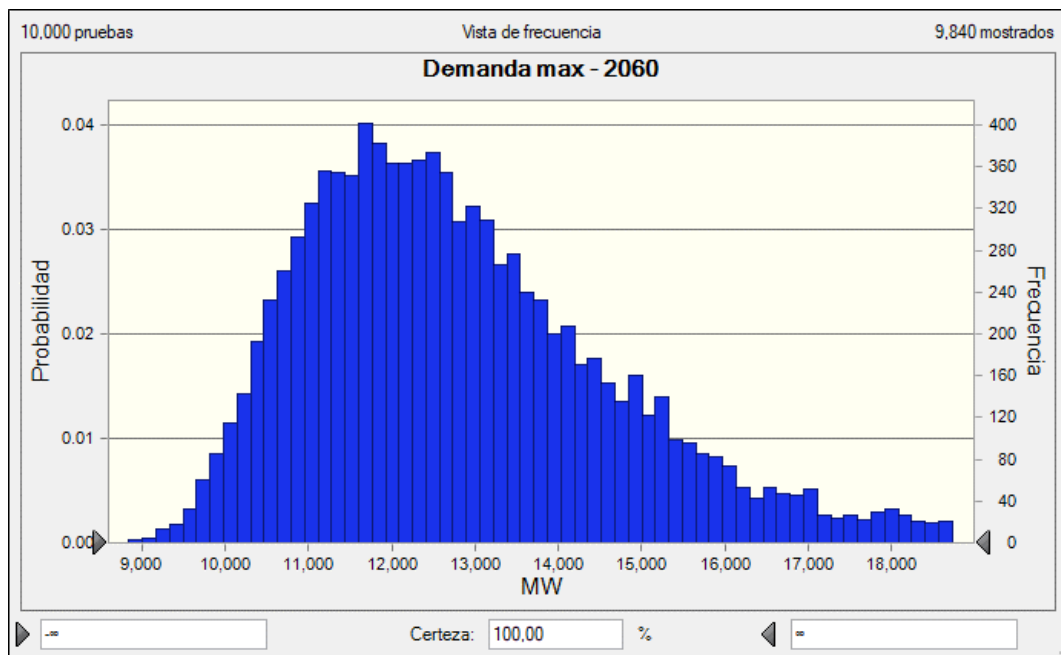
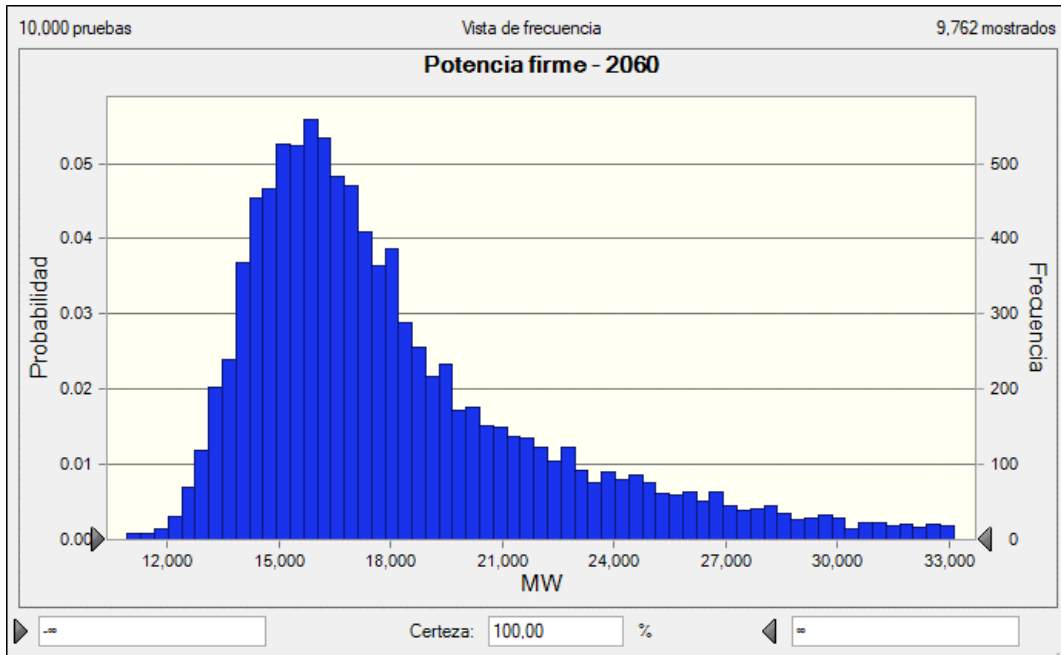
Ministerio de Medio Ambiente (2019). Volumen 2: Exposición de Zonas Costeras, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Ministerio del Medio Ambiente, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Watson, N. R. (2010). Impact of the Darfield earthquake on the electrical power system infrastructure. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43(4), 421–424. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.43.4.421-424>.

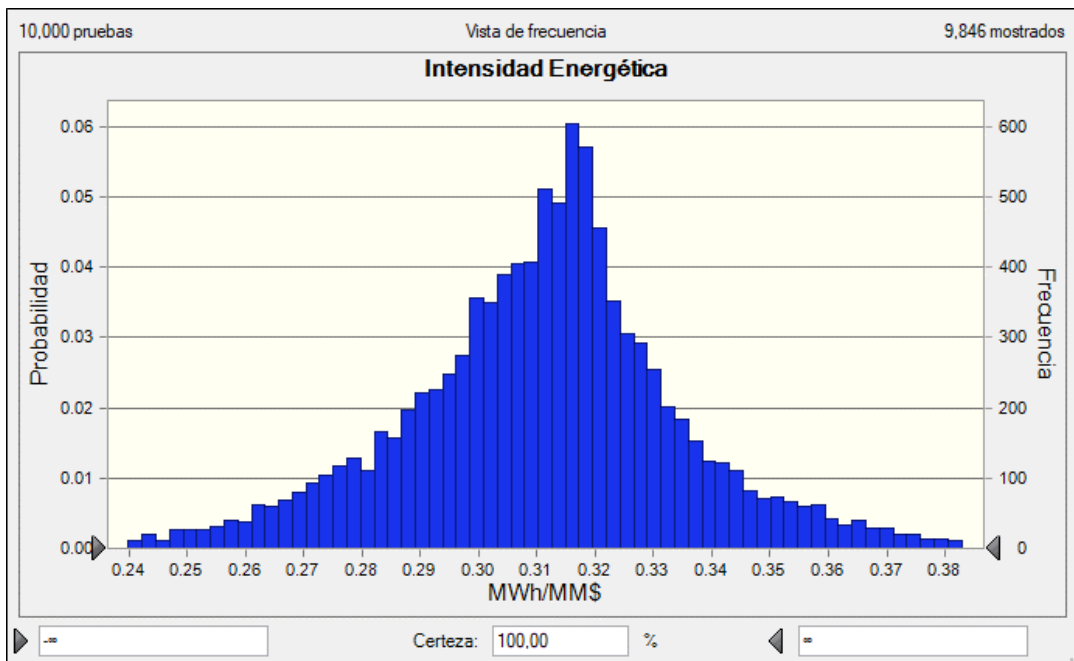
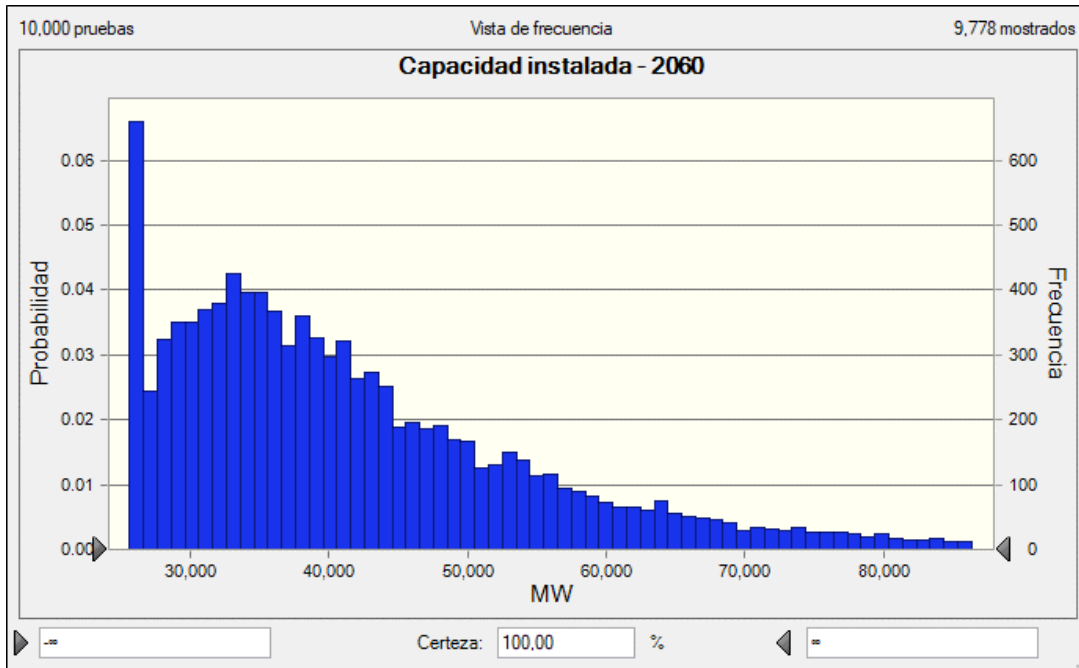


## ANEXO 1. SALIDAS DE LAS SIMULACIONES DE MONTECARLO AL AÑO 2060





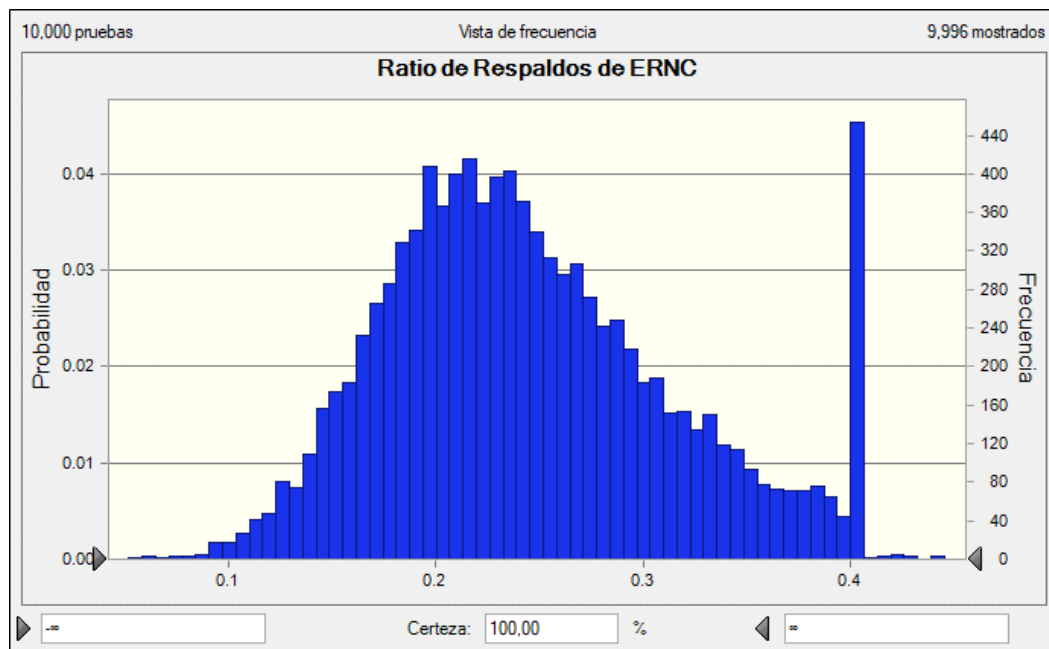
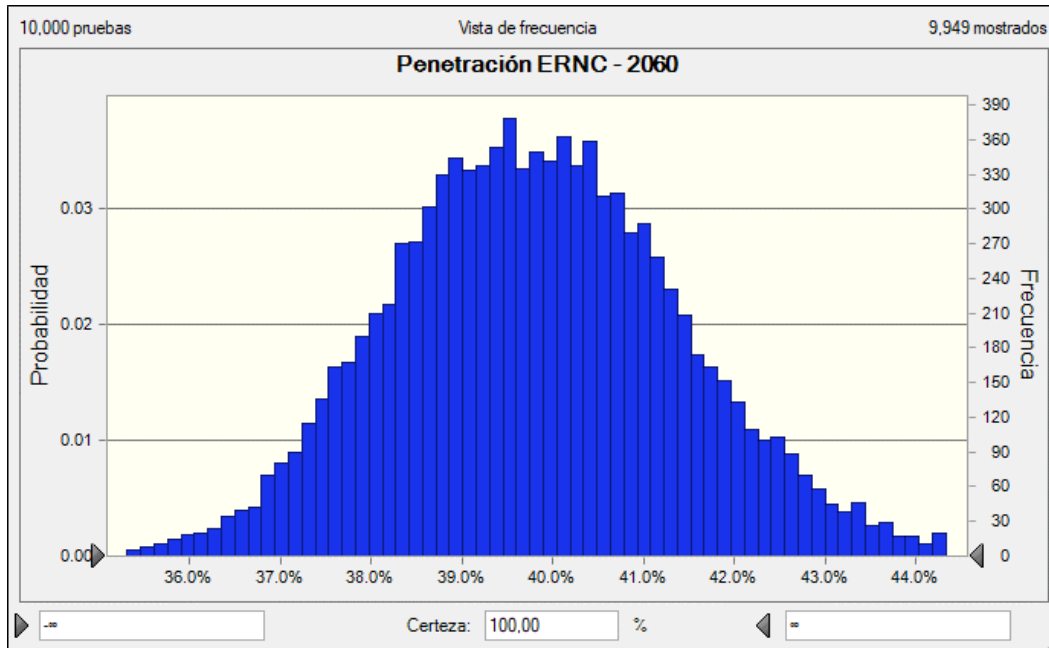






“Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático”

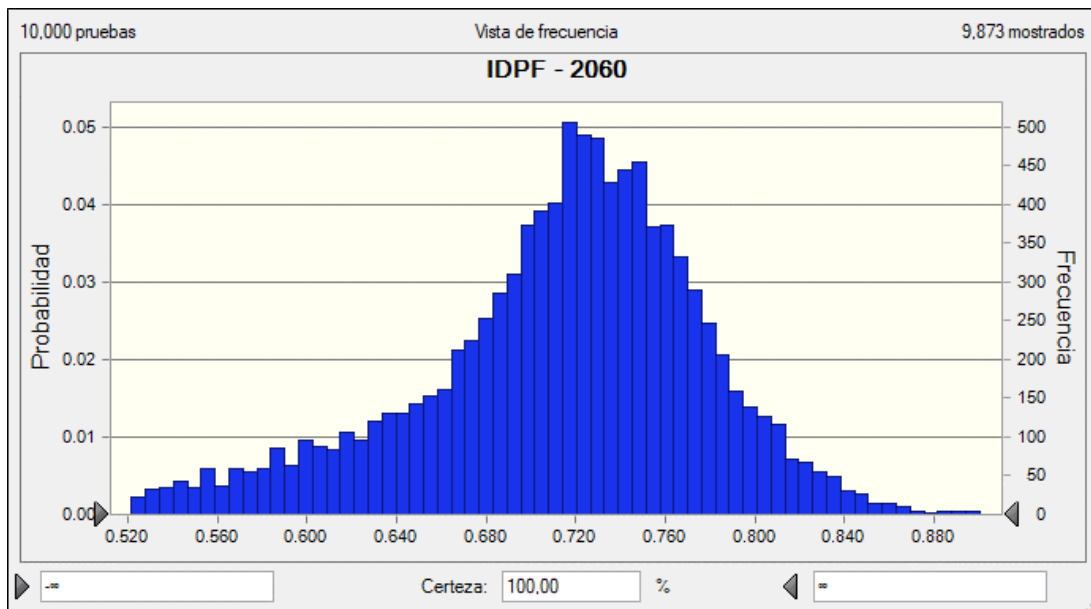
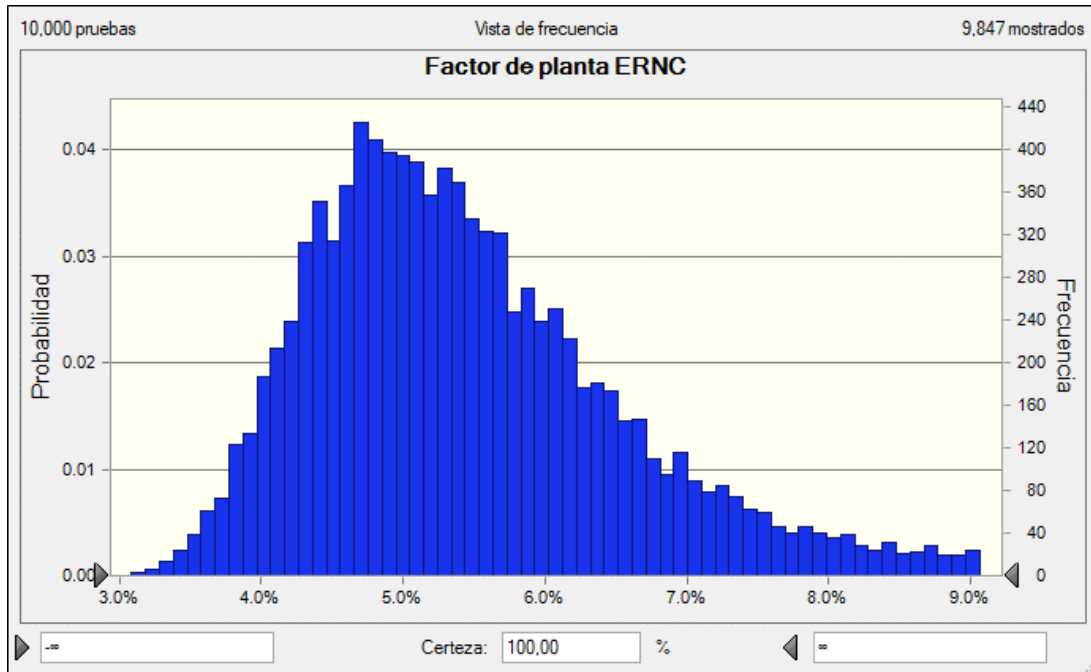
Informe Final

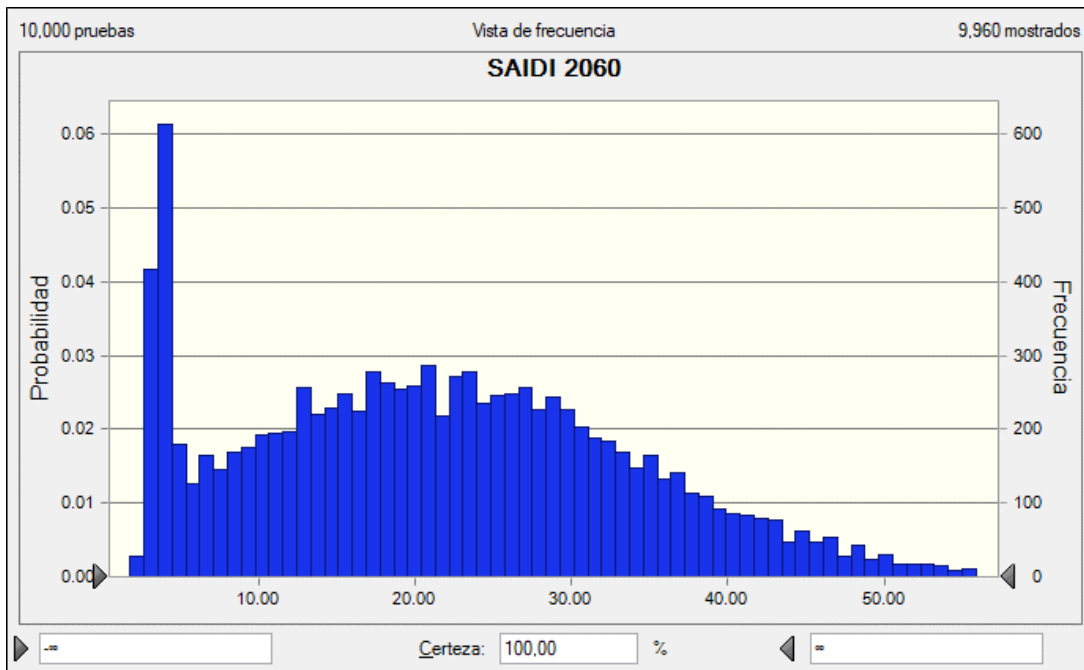
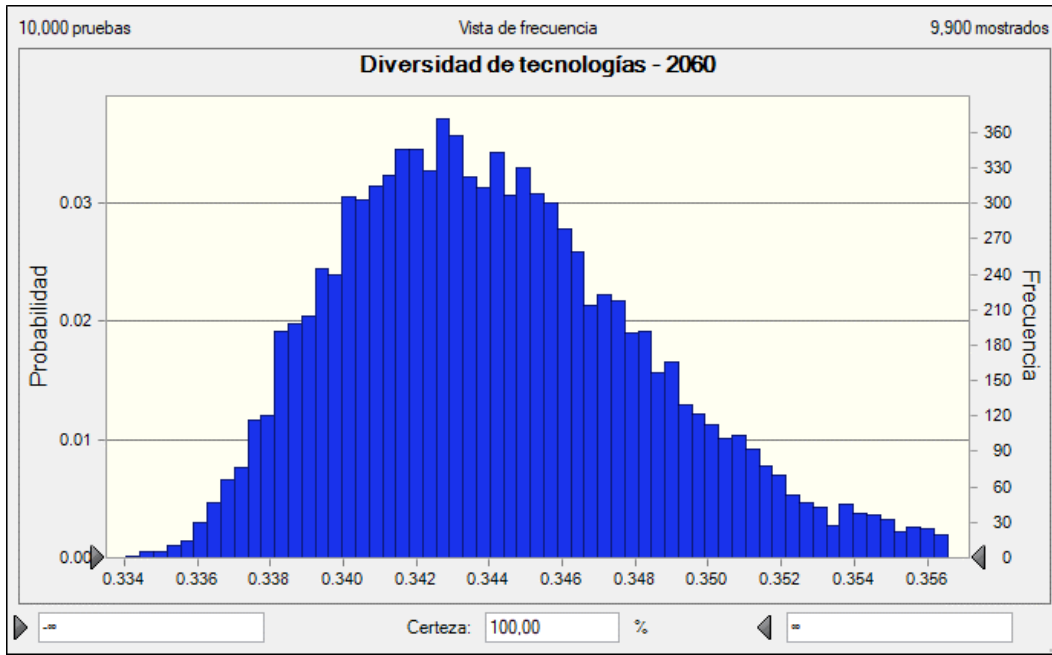




“Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático”

Informe Final







“Análisis y Elaboración de una Propuesta Técnica de Índices Cuantitativos de Impacto en el Sistema Energético Nacional ante Amenazas Naturales y Exacerbadas Producidas por el Cambio Climático”

Informe Final

