

**REPÚBLICA DE CHILE
SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL
DIRECCIÓN EJECUTIVA**

**SE PRONUNCIA SOBRE LA VIGENCIA
Y OBSERVANCIA DEL CRITERIO DE
EVALUACIÓN EN EL SEIA: CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN
AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO
RESOLUCIÓN EXENTA**

SANTIAGO, 10 DE NOVIEMBRE DE 2023

VISTOS:

Lo dispuesto en la Ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente (en adelante, “Ley N°19.300”); en el Decreto Supremo N°40, de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente, que establece el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (en adelante, “Reglamento del SEIA”); en el Decreto con Fuerza de Ley N°1/19.653, que Fija el Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la Ley N°18.575, Orgánica Constitucional de Bases Generales de la Administración del Estado; en la Ley N°19.880, sobre Bases de los Procedimientos Administrativos que rigen los Actos de los Órganos de la Administración del Estado; en el Decreto N°40, de fecha 06 de abril de 2022, del Ministerio del Medio Ambiente, que nombra Directora Ejecutiva del Servicio de Evaluación Ambiental; y en la Resolución N°07 del 26 de marzo del año 2019 de la Contraloría General de la República, que Fija Normas sobre Exención del Trámite de Toma de Razón.

CONSIDERANDO:

1. Que, la letra d) del artículo 81 de la Ley N°19.300 establece que corresponderá al Servicio de Evaluación Ambiental “*uniformar los criterios, requisitos, condiciones, antecedentes, certificados, trámites, exigencias técnicas y procedimientos de carácter ambiental que establezcan los ministerios y demás organismos del Estado competentes, mediante el establecimiento, entre otros, de guías trámite*”.
2. Que, el inciso 2° del artículo 4° del Reglamento del SEIA, dispone que el “*Servicio podrá, de conformidad a lo señalado en el artículo 81 letra d) de la Ley, uniformar los criterios o exigencias técnicas asociadas a los efectos, características o circunstancias contempladas en el artículo 11 de la Ley, los que deberán ser observados para los efectos del presente Título*” (Título II del Reglamento del SEIA).
3. Que la “*Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA*” publicada y vigente desde el 13 de enero de 2023 por Resolución Exenta N°20239910135 hace mención de la necesaria predicción de impactos sobre el recurso hídrico acorde con la condición más desfavorable producto de cambio climático.



4. Que, en el ejercicio de las facultades precedentemente señaladas, el Servicio elaboró el documento “**Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico**”.

Este documento tiene por objetivo entregar una metodología para proyectar los cambios de precipitación y temperatura producto del cambio climático, estableciendo para ello una zonificación de Chile y los porcentajes de cambio de precipitación para cada zona. A su vez se establece un valor fijo para todo Chile en materia de aumento de temperatura. Con ello se espera simplificar y aunar los valores de proyecciones que posteriormente son usados en la predicción de impactos sobre el recurso hídrico.

RESUELVO:

1. **Tener presente** que el documento singularizado en el Considerando N°4 de la presente resolución se encuentra vigente, debiendo observarse su contenido de acuerdo con lo establecido en la letra d) del artículo 81 de la Ley N°19.300 y en el Decreto Supremo N°40, de 2012, Reglamento del SEIA, del Ministerio del Medio Ambiente.
2. **Actualizar** la “Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA” a la vista de lo dispuesto en el documento “Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico”, generando con ello una segunda edición de dicha guía.

ANÓTESE, COMUNÍQUESE, PUBLÍQUESE Y ARCHÍVESE

**VALENTINA DURÁN MEDINA
DIRECTORA EJECUTIVA
SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL**

JCMF/BMA/MCM/CCH/MGL/ozr

Distribución:

- Direcciones Regionales, Servicio de Evaluación Ambiental
- División Jurídica, Servicio de Evaluación Ambiental.
- División de Evaluación y Participación Ciudadana, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Coordinación Regional, Servicio de Evaluación Ambiental.
- División de Tecnologías y Gestión de la Información, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Departamento de Auditoría Interna, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Departamento de Comunicaciones, Servicio de Evaluación Ambiental.

c.c:

- Dirección Ejecutiva, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Of. Partes, Servicio de Evaluación Ambiental



Firmado por: Juan
Cristóbal Moscoso
Farias
Fecha: 10/11/2023
16:33:14 CLST



Firmado por: Valentina
Alejandra Durán
Medina
Fecha: 10/11/2023
16:58:42 CLST

CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico



CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEIA: CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO

Autor: Servicio de Evaluación Ambiental

Primera Edición

Santiago, noviembre 2023

Diseño y diagramación: Servicio de Evaluación Ambiental

Fotografía de portada: Adobe Stock

Fotografías interior: Adobe Stock, Deposiphotos

Como citar este documento: Servicio de Evaluación Ambiental, 2023. Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico. Primera edición.

Si desea presentar alguna consulta, comentario o sugerencia respecto del documento, por favor, escribir al siguiente correo comentarios.documentos@sea.gob.cl

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	5
RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. MARCO CONCEPTUAL	10
2.1 Escenarios de emisión (RCP)	11
2.2 Modelos climáticos globales (GCM)	13
2.3 Proyecciones de cambio climático	14
3. PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN CHILE	16
3.1 Atlas de Riesgo Climático (ARClm)	16
3.1.1 Precipitación y temperatura proyectada	19
3.2 Balance Hídrico Nacional	22
4. VARIACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL SEIA	25
4.1 Ejemplo de aplicación	29
5. APLICABILIDAD DEL CRITERIO METODOLÓGICO	32
6. BIBLIOGRAFÍA	33
1. ANEXO A. Metodología de agrupación	35
2. ANEXO B. Alternativas para obtención de variables hidrometeorológicas bajo escenarios de CC	37
2.1 Proyecciones propias	37
2.2 Balance Hídrico Nacional	39



PRESENTACIÓN

En un contexto de crisis ambiental, nos enfrentamos al aumento de la contaminación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático (CC). Con esta realidad, Chile ha tomado decisiones siendo uno de los 193 Estados miembro que firmó, en septiembre de 2015, la Agenda 2030 para el Desarrollo Universal, cuyo objetivo 13 Acción por el Clima, indica la necesidad de adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Avanzando en estas materias, el 13 de junio de 2022 se publica la Ley N°21.455 Marco de Cambio Climático, estableciendo la institucionalidad, instrumentos de gestión y mecanismos de financiamiento para que el país enfrente el CC en materia de mitigación y adaptación y, de esta manera, cumplir con los compromisos internacionales asumidos en 2015 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 21), más conocido como el Acuerdo de París. Adicionalmente, la Ley establece una meta nacional que propone alcanzar la carbono neutralidad a más tardar el 2050 y adaptarse al CC, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la resiliencia a los efectos adversos del CC. Para ello formaliza la institucionalidad existente y consagra responsabilidades y obligaciones a 13 ministerios, regiones y comunas, así como un número importante de instrumentos de gestión. En este sentido, la Ley mandata la consideración del CC en los componentes del medio ambiente que resulten pertinentes en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Por otro lado, la actual administración de la Dirección Ejecutiva del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), desde abril de 2022, estableció tres ejes principales de gestión:

1. Asegurar una evaluación y gestión técnica de excelencia, apegada a la normativa con unificación de criterios.
2. Implementación progresiva del Acuerdo de Escazú en el SEIA.
3. Incorporación del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental.

En esta línea, el SEA publica la *Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b), la cual establece un marco metodológico general para la incorporación del cambio climático en la evaluación ambiental, tanto de las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA), como también en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA). Esta nueva exigencia viene de la mano del desafío de desarrollar metodologías específicas por componente ambiental para la consideración del cambio climático.

El presente documento busca fortalecer la incorporación del CC en la predicción de impactos sobre el recurso hídrico; por lo tanto, está dirigido a los especialistas que efectivamente realizan esta predicción y a evaluadores del SEA y de los otros Órganos de la Administración del Estado con Competencia Ambiental (Oaeca) que deben revisar sus resultados. De este modo, se entregan indicaciones sobre el uso de la información de proyecciones hidrometeorológicas actualmente disponibles, y criterios de aplicabilidad dentro del SEIA.

La necesidad de publicar este documento viene de un diagnóstico realizado sobre la forma en que los proyectos han incorporado el CC en la evaluación ambiental del recurso hídrico. Se observa que a la fecha se utiliza una gran variedad de fuentes de información, aplicando diferentes criterios para realizar proyecciones de precipitación y temperatura, generando un uso dispar de las proyecciones obtenidas. De este modo, el SEA, al estandarizar la forma de hacer uso de la información disponible, da certeza técnica a la evaluación ambiental y beneficia tanto a titulares de proyectos como a consultores al optimizar los esfuerzos y recursos que disponen para la elaboración de DIA y EIA.

Se hace presente que este documento materializa la atribución del SEA expresada en el artículo 81, letra d), de la Ley N°19.300, Sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en torno a uniformar criterios, requisitos, condiciones, antecedentes, certificados, trámites, exigencias técnicas, y procedimientos de carácter ambiental que establezcan los ministerios y demás organismos del Estado competentes, en particular respecto al procedimiento de evaluación ambiental, a través de guías y otros instrumentos¹.

Para la elaboración de este documento se tuvo presente el resultado de la “Consultoría para la Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico”, realizada por la empresa Hídrica Consultores SpA, así como también participaron profesionales de la Dirección General de Aguas (DGA) del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos y de la División de Estudios y Planificación, y profesionales del Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

¹ Tener en consideración el instructivo que Imparte instrucciones sobre la aplicabilidad de las guías y criterios de evaluación publicados por la Dirección Ejecutiva del Servicio de Evaluación Ambiental, Of. N°202399102593, disponible en el [link https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/07/24/Instructivo%20SEA%20aplicabilidad%20gu%C3%ADas%20y%20criterios%202023.pdf](https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/07/24/Instructivo%20SEA%20aplicabilidad%20gu%C3%ADas%20y%20criterios%202023.pdf)

RESUMEN

El objetivo del presente documento es entregar una metodología para el cálculo de la variación en precipitación y temperatura en Chile, valores que posteriormente deben ser usados para la predicción de impactos sobre el componente hídrico en aquellos casos donde se identifiquen sinergias negativas entre un proyecto y el CC.

Para una mayor comprensión y justificación técnica de la metodología, el capítulo 2 presenta el marco conceptual detrás de las proyecciones de variables hidrometeorológicas bajo escenarios de CC. Este es clave para tener conocimientos básicos respecto de los escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), los modelos climáticos globales y la ciencia que estudia las proyecciones de CC.

Luego de esta aproximación teórica general, en el capítulo 3 se presentan las proyecciones actualmente disponibles de las variaciones futuras de precipitación y temperatura para Chile. En este sentido, se hace referencia a las dos principales fuentes de información oficial: el Atlas de Riesgos Climáticos (ARClím), elaborado por el MMA, y el Balance Hídrico Nacional (BHN), elaborado por la DGA.

Con ello, el documento, en su capítulo 4, procede a explicar la metodología que han de aplicar titulares y consultores, y que será revisada por los evaluadores SEA y Oaeca competentes, culminando con ejemplos que faciliten su comprensión.

Finalmente, se presentan anexos que entregan más detalles respecto de la construcción de la metodología, y ofrecen una vía para la elaboración de proyecciones propias por parte de titulares, cuando esto fuere necesario.



1. INTRODUCCIÓN

La *Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b) entrega las directrices generales para la incorporación del Cambio Climático (CC) en la evaluación ambiental de Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) y Estudios de Impacto Ambiental (EIA), según lo estableció la Ley N°21.455 Marco de Cambio Climático, la cual mandata la consideración de la variable de CC en los componentes del medio ambiente que resulten pertinentes en el marco del SEIA.

En el caso del recurso hídrico, es el más directamente afectado por el clima, siendo prioritario abordarlo en el SEIA. Para ello la guía metodológica recomienda realizar la predicción de impactos e identificación de su significancia utilizando las proyecciones del clima futuro bajo el escenario RCP 8.5 de altas emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Por esto se sugiere el uso de las variables hidrometeorológicas disponibles en el explorador de amenazas de la plataforma ARclim, desarrollado por el MMA. Sin embargo, la guía no entrega una metodología de cómo utilizar esta información.

Por lo anterior, mediante licitación pública, el SEA adjudicó a Hídrica Consultores SpA el desarrollo de la asesoría “Consultoría para la Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico”, la cual tuvo por objetivo analizar la información disponible en ARclim y elaborar metodologías para incorporar el CC en la predicción de impactos sobre el recurso hídrico. Algunos de los resultados de esta consultoría sirvieron como insumo para la elaboración de este documento.

Cabe destacar que este documento consiste en un primer esfuerzo por trabajar directamente con los datos de proyecciones de CC vinculados a impactos sobre el componente hídrico. En este sentido, la intención no es entregar metodologías para incorporar sus resultados en cada uno de los problemas asociados a la evaluación ambiental de recursos hídricos, sino más bien

exponer las proyecciones actualmente disponibles, sus diferentes grados de incertidumbre y desde ahí proponer una metodología para hacer uso de esta información.

En consideración a que los efectos del CC generan alteraciones en múltiples variables hidrometeorológicas, lo relevante es tener en cuenta que las más determinantes para el desarrollo de estudios relacionados con los recursos hídricos son la precipitación y la temperatura. Por este motivo, el criterio técnico que se presenta en este documento está enfocado en el uso y determinación de proyecciones de CC para estas dos variables.

De este modo, se da certeza a los actores que participan de la evaluación ambiental, al indicar cuáles son las variaciones de precipitación y temperatura que se deben utilizar en el marco del SEIA, con lo cual se facilita el proceso de elaboración, revisión y evaluación de DIA y EIA.

.....

El objetivo del presente documento es entregar un criterio para determinar variaciones de precipitación y temperatura por efecto del CC. Cabe destacar que está fuera del alcance de este documento el entregar metodologías específicas para estimar las variables del ciclo hidrológico a partir de los cambios de precipitación y temperatura. Por lo tanto, las metodologías o supuestos que propongan los titulares deberán estar debidamente descritos y justificados.

.....



2. MARCO CONCEPTUAL

La variabilidad climática ocurre de forma natural dentro del sistema climático, debido a procesos de interacción física “internos”, como el intercambio de calor a través y entre la atmósfera y el océano. Una segunda fuente de variabilidad climática proviene de factores “externos” al sistema climático, los cuales tienen la capacidad de alterar el balance radiativo² de la tierra y la atmósfera. Entre ellos se encuentran la actividad volcánica, actividades antropogénicas, cambios en la radiación proveniente del sol o cambios en la órbita terrestre. Algunos de estos factores externos pueden ser considerados parte de la variabilidad climática natural, como el ciclo solar o la actividad volcánica.

En este contexto, el CC hace referencia a una **variación de largo plazo estadísticamente significativa en las propiedades del clima**, tanto de sus valores medios como de su variabilidad, y que pueden ser atribuibles a procesos internos y externos, naturales y antropogénicos³.

Los factores externos también se conocen como **“forzantes”**, y generan un desbalance en la radiación neta de la Tierra, es decir, la diferencia entre la radiación recibida y emitida⁴. Las forzantes negativas tienen el efecto de enfriar el sistema climático, mientras que las forzantes positivas tienen el efecto de calentarlo. En ese sentido, los GEI son una forzante positiva, ya que retienen una parte de la radiación emitida por la Tierra al mismo tiempo que aumentan la absorción de la radiación solar. Algunos ejemplos de los GEI más relevantes son el metano

² Energía que la Tierra recibe del Sol en comparación con la energía que la Tierra libera al espacio.

³ La Ley Marco de Cambio Climático define el CC en su art. 3º letra b) como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

⁴ La Ley Marco de Cambio Climático define en su art. 3º letra g) a los forzantes climáticos de vida corta como “conjunto de compuestos con efecto climático, siendo gases, aerosoles o partículas, incluyendo carbono negro, cuya vida media en la atmósfera, después de ser emitidos o formados, se estima en horas o hasta décadas, en un rango siempre inferior a la vida media del dióxido de carbono”.

(CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los halocarburos, siendo el de mayor influencia el dióxido de carbono (CO₂), en términos de que aumenta positivamente el desbalance radiativo de la Tierra (CSIRO and Bureau of Meteorology 2015).

La comunidad científica, reunida en el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático⁵ (IPCC), en sus Informes de Evaluación (*Assessment Report*, AR) utiliza posibles escenarios futuros representativos de concentración (*Representative Concentration Pathways*, RCP), que describen la evolución temporal de los GEI. Luego, mediante modelos de circulación general atmosférica (*global climate models*, GCM), es posible modelar y predecir el comportamiento de ciertas variables atmosféricas de interés para diferentes escenarios futuros de emisión de GEI.

Para una mejor comprensión de estas materias, el capítulo 2 aclara conceptos y metodologías que construyen la base científica para comprender el criterio técnico que establece el documento en el capítulo 4. Se revisa qué son los escenarios de emisión y los modelos climáticos globales (GCM), para con ello explicar cómo estos contribuyen a la estimación de proyecciones climáticas. Luego, en el capítulo 3 se revisa la materialización de estas proyecciones en territorio chileno, dando cuenta de las dos herramientas oficiales que permiten obtener información respecto de las variables de precipitación y temperaturas, estas son el Atlas de Riesgos Climáticos (ARClim) y el Balance Hídrico Nacional (BHN).

2.1 Escenarios de emisión (RCP)

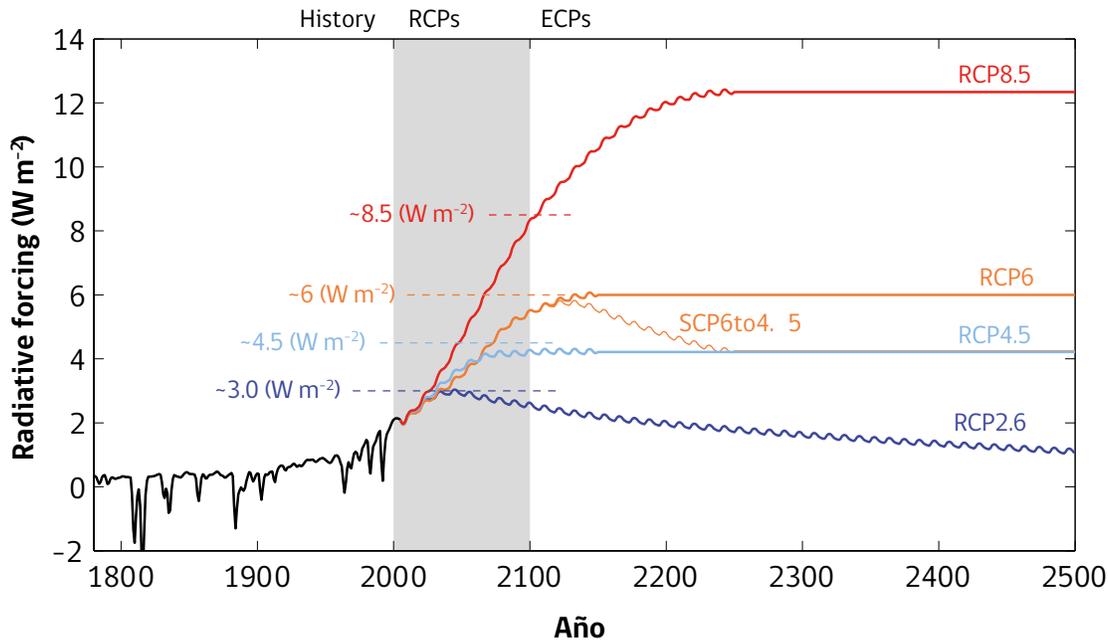
Las emisiones futuras de GEI de fuentes antropogénicas son altamente inciertas, ya que se ven influenciadas por incógnitas tales como el crecimiento económico y demográfico, el desarrollo y transferencias tecnológicas, y cambios políticos y sociales.

Debido a lo anterior, en el Quinto Informe de Evaluación (ARS, 2014), el IPCC seleccionó cuatro escenarios de emisión (Figura 1), los cuales ofrecen conjuntos de datos de resolución espacial del cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, especificando cuáles serán las concentraciones de GEI y las emisiones antropogénicas anuales hasta el 2100. Estos escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono (IPCC, 2013).

Los RCP se nombran en función de la magnitud de la forzante radiativa que ejercen. En este sentido, el RCP8.5 es el escenario que proyecta una forzante radiativa de 8.5 W/m² al 2100, donde se asume una baja reducción en las emisiones de CO₂. Por su parte, el RCP2.6 corresponde a un escenario ambicioso respecto de la reducción de emisiones, alcanzando una emisión máxima cercana al 2020 y luego bajando rápidamente.

5 <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>

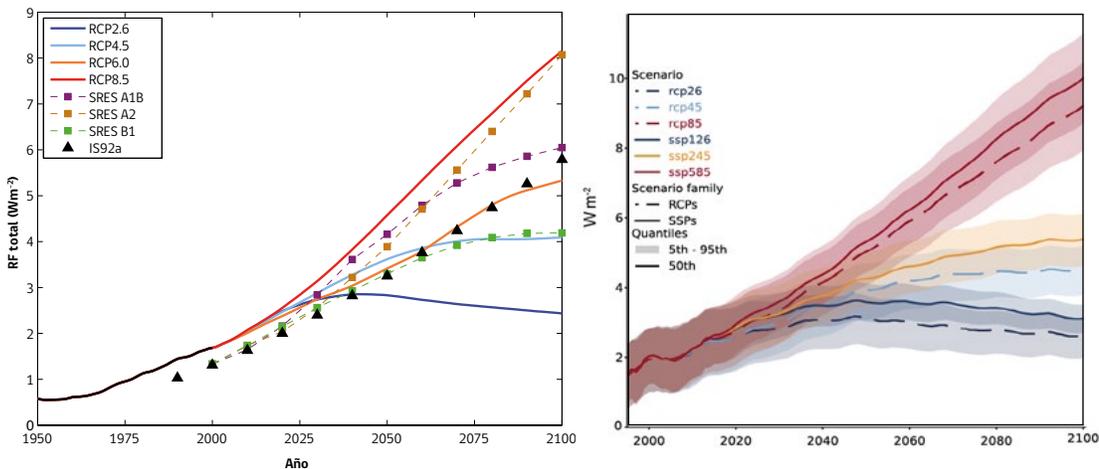
Figura 1. Escenarios de emisión Quinto Informe de Evaluación (AR5, 2014) del IPCC



Fuente: Cubasch et al., 2013. ECPs: escenarios extendidos.

Cabe destacar que, en sus diferentes Informes de Evaluación, el IPCC ha actualizado y cambiado la nomenclatura de los escenarios de emisión (Figura 2). Es así como en el Cuarto Informe de Evaluación (2007) se utilizaron los *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), mientras que en la sexta y última versión del Informe de Evaluación (AR6, 2023) se utiliza el término *Shared Socio-economic Pathways* (SSP) y la nomenclatura utilizada fue SSPx-y, donde "x" es el escenario socioeconómico e "y" es el valor del forzante radiativo aproximado al año 2100.

Figura 2. Comparación escenarios de emisión



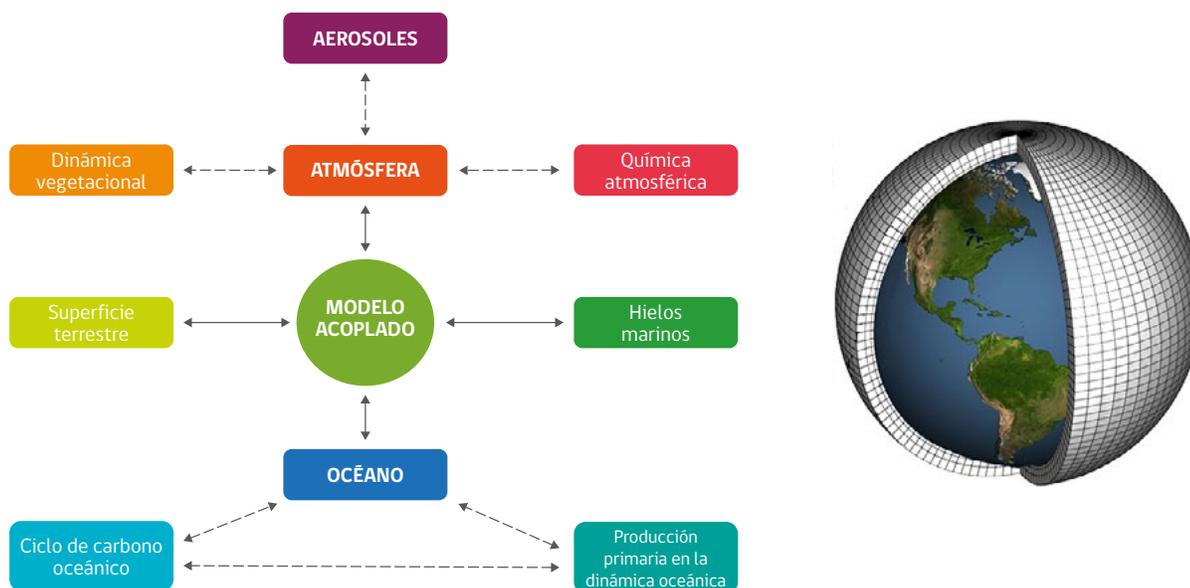
Fuente: izquierda (Cubasch et al., 2013), derecha (IPCC, 2021).

2.2 Modelos climáticos globales (GCM)

La herramienta utilizada para estudiar el clima futuro (para un determinado escenario de emisión) son los Modelos Climáticos Globales (GCM), los que consisten en una **representación matemática del sistema climático** y que se fundamenta en leyes de la física como la conservación de masa, energía y *momentum*.

Los GCM representan a la atmósfera y océanos como grillas tridimensionales de resolución espacial de 100-200 km (Figura 3), lo que les permite simular procesos de gran escala como progresiones de altas y bajas presiones o corrientes oceánicas, entre otros. Gracias a avances tecnológicos, los GCM actualmente son capaces de representar interacciones del ciclo del carbono entre el océano, la atmósfera y el suelo, incluyendo la química atmosférica y la vegetación (Figura 3).

Figura 3. Izquierda, esquema conceptual de modelo climático global (GCM); derecha, esquema grilla tridimensional de resultados de un GCM



Fuente: izquierda, CSIRO and Bureau of Meteorology, 2015. Derecha, NOAA, 2012.

Sin embargo, debido a la gran escala de los GCM y también a las incertidumbres respecto de cómo representar ciertos procesos, aún existen limitaciones para la representación de algunas características regionales o locales relacionadas con la topografía o línea costera, por ejemplo. Lo anterior afecta el grado de certeza en la estimación de las variables meteorológicas, como la precipitación o la temperatura.

En los Reportes de Evaluación del IPCC se utilizan los GCM abordados en el *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), que a su vez es una iniciativa del *World Climate Research Programme* (WCRP). El objetivo del CMIP es comprender mejor los cambios climáticos pasados, presentes y futuros que surgen de la variabilidad natural no forzada o en respuesta a cambios en el forzamiento radiativo en un contexto de múltiples GCM. Este entendimiento incluye evaluaciones del desempeño de los GCM durante el período histórico y cuantificaciones de las causas del diferencial en relación con proyecciones futuras.

2.3 Proyecciones de cambio climático

La obtención de proyecciones de alguna variable atmosférica en particular, como la temperatura o la precipitación, es el resultado de un proceso que involucra varias etapas (Figura 4), cada una con diferentes grados de dificultad e incertidumbre.

Figura 4. Proceso de estimación de proyecciones de variables climáticas bajo escenarios de cambio climático

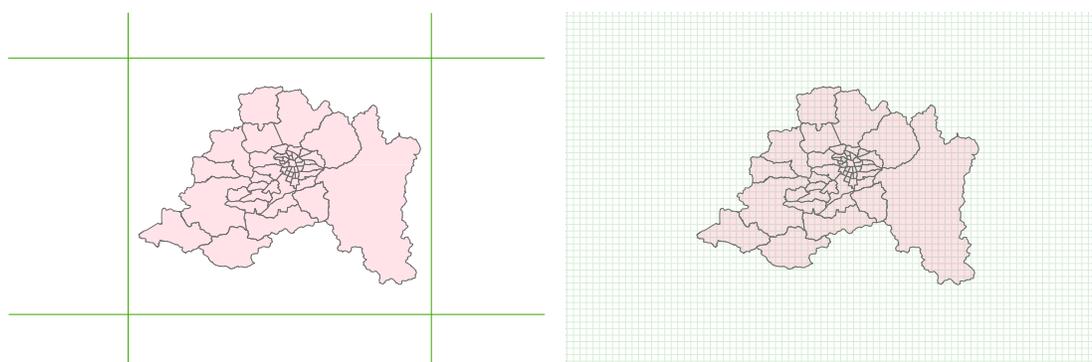


Fuente: elaboración propia.

Como se señaló anteriormente, los escenarios de emisión y GCM son productos que pueden ser obtenidos desde diferentes fuentes. Sin embargo, para obtener **resultados a escala local**, se deben aplicar **técnicas de escalamiento espacial** (*downscaling*), que consisten en metodologías que permiten mejorar la resolución de los resultados, llevándolos desde la escala de cientos de kilómetros a escalas más locales del orden de kilómetros.

A modo de ejemplo, un determinado GCM puede entregar un valor de precipitación promedio para la Región Metropolitana, pero mediante escalamiento es posible estimar diferentes valores de precipitación a nivel comunal o incluso escalas más pequeñas (Figura 5).

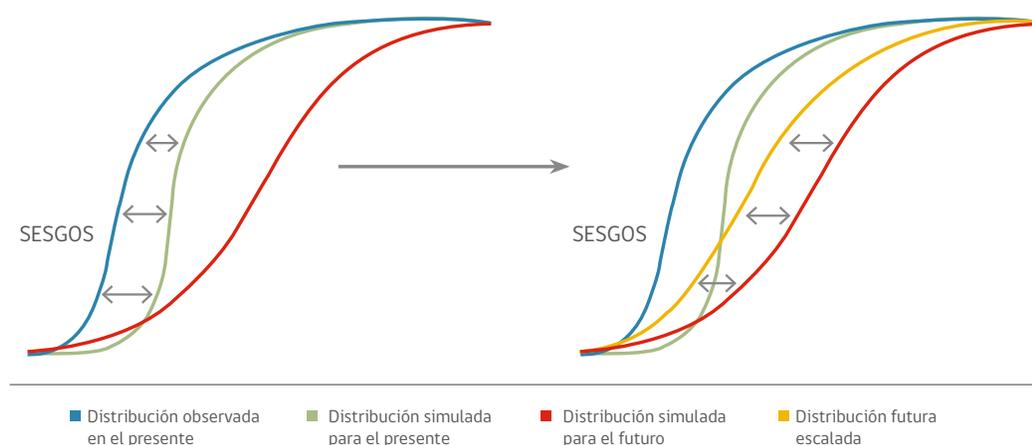
Figura 5. Ejemplo de escalamiento (downscaling) para GCM CSIRO-Mk3-6-0, de grilla horizontal de 210x210 km a grilla de 5x5 km



Fuente: elaboración propia.

Luego de realizado el escalamiento, se requiere ajustar las proyecciones de los GCM a los datos históricos observados, proceso conocido como **corrección de sesgo**. Lo que se busca es detectar inconsistencias entre los datos proyectados por el GCM y los datos históricos, para luego corregir las proyecciones históricas y futuras eliminando los sesgos identificados con respecto a los datos históricos.

Figura 6. Corrección de sesgo



Fuente: Pica-Téllez et al., 2020.

Finalmente, dependiendo de los escenarios y GCM considerados en el análisis, se podría contar con decenas o incluso cientos de resultados para una misma variable climática. En esta etapa es relevante el criterio experto del profesional para seleccionar el resultado de la proyección, que podría considerar criterios como el escenario más representativo de la trayectoria actual (RCP, SSP u otro), el GCM más representativo de la dinámica atmosférica regional, el peor o mejor escenario y el GCM de acuerdo con los objetivos del estudio en particular, criterios estadísticos como el promedio o el uso de percentiles, entre otros.



3. PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN CHILE

En Chile existen diferentes fuentes de información de proyecciones climáticas bajo escenarios de cambio climático. Entre ellas se encuentran los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica y el Balance Hídrico Nacional (BHN), ambos de la DGA, como también ARClím del MMA.

La *Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b) sugiere el uso de ARClím para la predicción hidrológica, debido a que es una fuente oficial, de acceso público a través de su plataforma *web* y cuya interfaz permite acceder a la información fácilmente. Por otro lado, se cuenta con el BHN, cuyo proceso de elaboración se inició el 2017 y finalizó en diciembre de 2022 con la publicación del estudio “Homologación de cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile”.

Estas dos fuentes de información, ARClím y el BHN, son las principales referencias disponibles actualmente y de las cuales se describen algunos de sus resultados a continuación.

3.1 Atlas de Riesgo Climático (ARClím)

ARClím es una herramienta del MMA del Gobierno de Chile desarrollada por distintas instituciones académicas y colaboradores, y publicada el 2020. Este proyecto se enmarca en el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022 (PANCCII), en cuyo eje de adaptación se estableció como objetivo general “fortalecer la capacidad de Chile para adaptarse al cambio climático”.

El objetivo de ARClím es desarrollar un conjunto de mapas de riesgos climáticos, empleando un marco conceptual común y una base de datos consistente. El proyecto ha tenido como guía el Quinto Reporte (AR5) del grupo de trabajo II (WGII) del IPCC (SEA, 2023a), en el que se indica que la estimación del riesgo (R) se realiza sobre la base de tres elementos básicos:

la amenaza (A), la exposición (E) y la vulnerabilidad (V), la que a su vez está determinada por la sensibilidad (S) y la capacidad adaptativa (CA)⁶.

Desde la perspectiva del usuario, la plataforma cuenta con tres secciones principales: los Mapas de Riesgo, el Explorador de Amenazas y los Mapas de Especies. De estas, el Explorador de Amenazas consiste en una interfaz con **datos climáticos** obtenidos a partir de los resultados de las simulaciones de GCM de la iniciativa CMIP-5⁷, en el escenario de emisiones RCP8.5, y que fue ajustado a una escala espacial de 0,05° x 0,05° (5x5 km) para Chile. Con esta información, el Explorador de Amenazas presenta el cambio en las condiciones climáticas entre el clima "Histórico" reciente (01ene 1980 a 31dic 2009) y las proyecciones del clima del "Futuro" intermedio (01ene 2035 a 31dic 2064)⁸.

ARClim utiliza un set de hasta 34 GCM para estimar las denominadas variables básicas, que son aquellas tomadas directamente de los resultados de los GCM.

Tabla 1. Número de GCM utilizados para determinar variables básicas en ARClim

CÓDIGO VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	NÚMERO GCM	NÚMERO CORRIDAS*
pr	Precipitación diaria	mm/día	34	67
tasmax	Temperatura máxima diaria	°C	32	60
tasmin	Temperatura mínima diaria	°C	32	60
ps	Presión en superficie	hPa	34	67
uas	Velocidad zonal	m/s	25	29

⁶ Las definiciones de estos conceptos se abordan de modo extenso en la *Guía metodológica para la consideración el cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023).

⁷ <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>

⁸ Cabe destacar que el MMA ha comprometido actualizar la plataforma ARClim con los GCM de CMIP-6 y los escenarios del AR6, en línea con lo provisto por parte del IPCC.

CÓDIGO VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	NÚMERO GCM	NÚMERO CORRIDAS*
vas	Velocidad meridional	m/s	25	29
rsds	Radiación global horizontal	W/m ²	29	34
huss	Humedad específica	g/kg	10	10

*Corresponde al total de proyecciones disponibles al considerar las diferentes versiones (ensambles) que tiene cada GCM.

Fuente: Pica-Téllez et al., 2020.

ARClím cuenta con un repositorio de datos climáticos desde el cual es posible descargar información extendida, en distintos formatos, de manera adicional a los disponibles en el Explorador de Amenazas Climáticas. El repositorio cuenta con dos secciones, una de **datos grillados** y otra de **datos en unidades geográficas**.

En la sección de datos grillados es posible obtener —en formato GeoTiff—, para diferentes estaciones del año, la grilla completa de Chile con los valores promedio de cada uno de los índices, para los períodos “Histórico”, período “Futuro” y delta entre ambos. Esta información representa el **promedio** de todas las proyecciones de los GCM, correspondientes para cada uno de los índices climáticos.

Por otro lado, en la sección de datos en unidades geográficas, es posible obtener dos tipos de información, la de las amenazas climáticas consolidadas y la de datos diarios. Esta información se encuentra disponible a distintas escalas espaciales, donde las principales son a nivel comunal (345 comunas) y regional (16 regiones).

Respecto de la escala temporal, los datos diarios en formato .csv se encuentran disponibles para cada GCM para los períodos “Histórico” y “Futuro”. Es decir, no se dispone de los datos continuos a nivel diario para todo el período (1970-2070).

Finalmente, el proyecto ARClím cuenta con resultados de simulaciones basadas en modelos numéricos de otras componentes del sistema terrestre (hidrósfera y océano). En el caso de la modelación de hidrología, se consideró un conjunto de 4 GCM que entregaron las forzantes

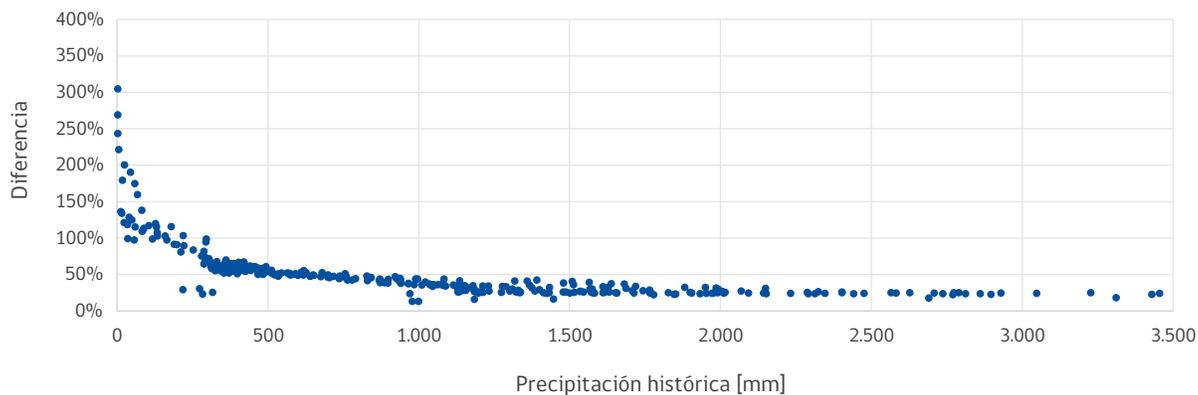
del modelo hidrológico VIC⁹, originalmente desarrolladas para el BHN, lo que permitió estimar caudales (a nivel diario y mensual) en el presente y en el futuro intermedio, para un conjunto de 116 cuencas a nivel nacional.

3.1.1 Precipitación y temperatura proyectada

De acuerdo con las proyecciones de cambio climático disponibles en ARClím, **las precipitaciones medias anuales presentarán variaciones, a nivel comunal, de entre -20% y +10% con respecto a los valores históricos** para la mayoría del territorio nacional. Cabe mencionar que estos son valores promedio, lo cual es relevante toda vez que, como se muestra en la Tabla 1, existen hasta 67 proyecciones de precipitación.

Lo anterior genera que, en algunas zonas del país, se proyecten variaciones porcentuales de precipitación que varían significativamente entre uno y otro GCM, lo cual está estrechamente relacionado con el valor de la precipitación anual histórica. De este modo, cuanto **menor** es la precipitación histórica, **mayor** es la diferencia entre el GCM más favorable y más desfavorable. La diferencia entre estas proyecciones se muestra en la Figura 7, donde se representa con un punto azul el valor de la diferencia para cada comuna del país.

Figura 7. Relación entre la precipitación histórica y la diferencia de precipitación proyectada a nivel comunal



Fuente: elaboración propia.

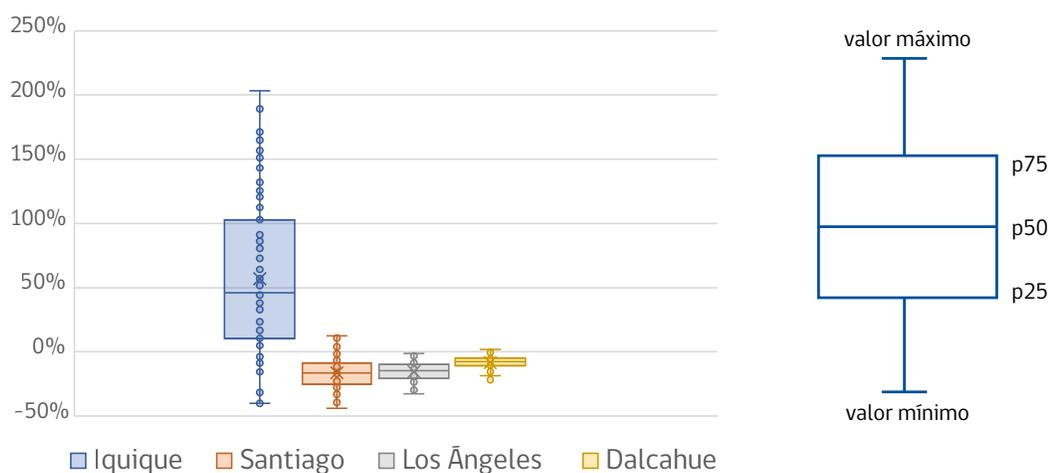
⁹ VIC es un modelo hidrológico macro-escalar, de parámetros semidistribuidos, capaz de resolver balances de agua y energía.

Así, por ejemplo, en Iquique se proyecta una variación porcentual que va desde un incremento de 200% a una disminución de casi un 50% de la precipitación; es decir, un rango de 250% aproximadamente (Figura 8, izquierda). En cambio, en zonas de mayor precipitación, como Santiago, Los Ángeles o Dalcahue, existe mayor consenso respecto del escenario futuro de precipitaciones.

Contar con tal cantidad de proyecciones, cuyos resultados varían significativamente entre sí, sumado a la dificultad para poder verificar cuáles GCM generan mejores proyecciones, implica un desafío al momento de escoger un valor para el escenario real futuro.

Para facilitar el análisis, se presentan los resultados mediante el uso de **percentiles**¹⁰ 25% (p25), 50% (p50) y 75% (p75), lo que permite establecer un **rango de proyecciones**. De esta forma es posible definir un valor proyectado de menor (p25) y mayor (p75) magnitud de precipitación, y al mismo tiempo **dejar fuera del análisis proyecciones más extremas que podrían no ser representativas** (Figura 8, derecha).

Figura 8. Izquierda, ejemplo variación porcentual de precipitación en diagrama de caja; derecha, conceptualización diagrama de caja



Fuente: elaboración propia.

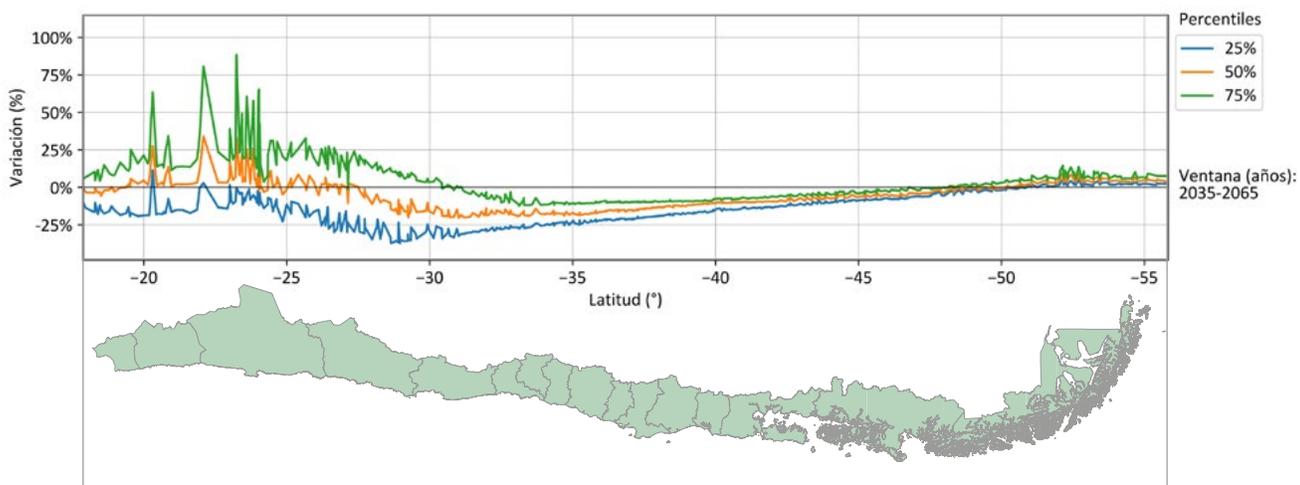
En la Figura 9 se presenta la variación porcentual de precipitación proyectada por latitud para todo Chile, entre el período histórico y el período futuro 2035–2065 para los percentiles p25, p50 y p75, donde la línea negra del 0% representa la continuidad de clima histórico. Los datos sobre esta línea indican un aumento porcentual de precipitación, y bajo ella, una

¹⁰ El percentil es una medida de posición usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un grupo. Por ejemplo, el percentil 25 es el valor bajo el cual se encuentran el 25% de las observaciones, y el 75% restante son mayores.

disminución. En el análisis del gráfico es posible observar que la mayor amplitud entre los p25 y p75 se encuentra en la zona norte del país, entre la Región de Arica y Parinacota y la Región de Coquimbo (ver distancia entre la línea azul y línea verde). Como ya se mencionó, esto se debe a que la magnitud de las precipitaciones en estas zonas es más bien baja y, por lo tanto, un aumento o disminución menor en términos de milímetros totales, resulta ser significativo en términos porcentuales.

Adicionalmente, se observa que en la zona norte del país, aproximadamente la mitad de los GMC, proyectan un aumento en las precipitaciones; entre Atacama y Aysén, se proyecta una disminución, y en Magallanes, se proyecta un aumento en las precipitaciones.

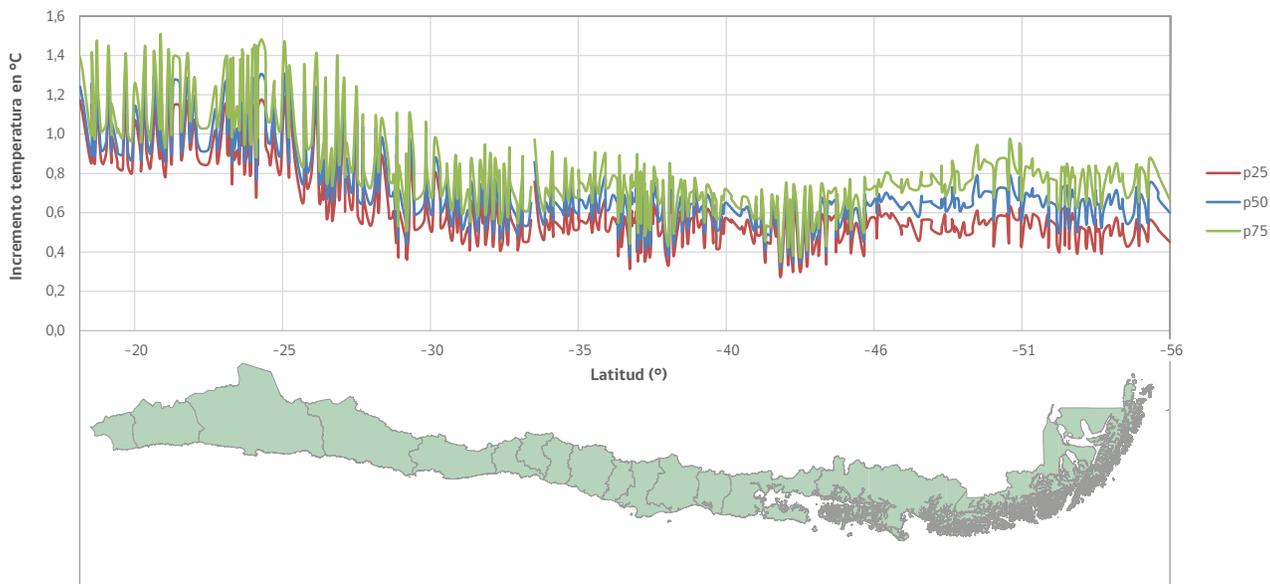
Figura 9. Proyección de cambio en la precipitación ARCLim



Fuente: elaboración propia en base a SEA, 2023a.

En cuanto a la variable temperatura, en la Figura 10 se presenta el incremento en °C por latitud para todo Chile, entre el período histórico y el período futuro 2035-2065, utilizando percentiles p25, p50 y p75 a nivel de subcuenca. Cabe destacar que en este caso **el análisis se realiza en términos absolutos y no porcentuales**, toda vez que la variación de la temperatura es pequeña y estable a lo largo del país y, por lo tanto, más fácil de visualizar en términos absolutos.

Figura 10. Proyección de cambio en la temperatura ARClim



Fuente: elaboración propia.

En consecuencia, a lo largo del país se observa un **aumento promedio de la temperatura de entre 0,4°C y 1,4°C**. Además, todos los GCM proyectan un aumento en la temperatura y la diferencia entre los percentiles p25 y p75 es de sólo 0,2°C en promedio, lo que implica menores niveles de incertidumbre para esta variable, toda vez que las proyecciones son similares entre percentiles.

3.2 Balance Hídrico Nacional

En la DGA recae la responsabilidad de elaborar el Balance Hídrico Nacional (BHN). Su última versión se encuentra en el estudio "Homologación del Cálculo Hidrológico para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile" (DGA, 2022), el cual surge de la necesidad de establecer una metodología consistente, robusta y única del cálculo hidrológico para el territorio nacional. Lo anterior con el objetivo de unificar los resultados obtenidos en las cuatro etapas de la Actualización del Balance Hídrico Nacional, desarrolladas entre 2017 y 2019.

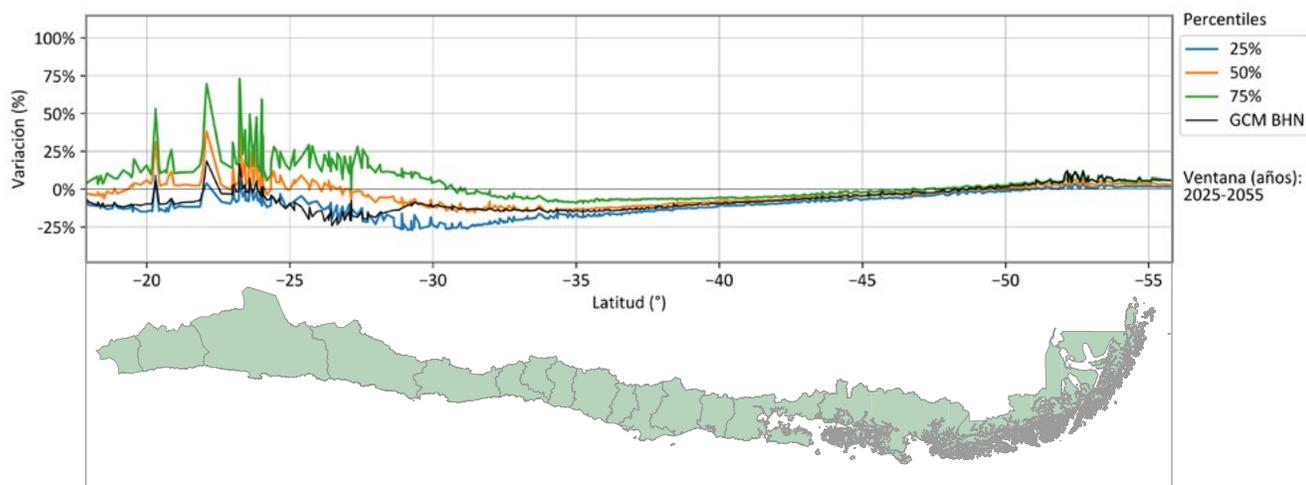
Para su desarrollo se usaron las proyecciones de cuatro modelos de circulación global (GCM) del CMIP5: CCSM4, CSIRO-MK3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, con información grillada espacialmente de una resolución de 0,05° x 0,05°. Estos GMC fueron seleccionados por representar adecuadamente la influencia del fenómeno del Niño (ENSO) y la Oscilación Antártica (SAM), además de representar diversas sensibilidades climáticas y cambios regionales. Se utilizaron los ensambles base (r1i1p1) de estos GCM para un escenario RCP8.5.

En este último estudio de homologación del BHN, se utilizó un producto de referencia de precipitaciones y temperaturas actualizado, correspondiente a CR2Met v2.5, a diferencia de

las versiones usadas en las etapas previas. Adicionalmente, se cambió el método de corrección de sesgo desde un método de escalamiento univariado (QDM) a uno multivariable (MBCn). Por último, el período histórico utilizado para el escalamiento estadístico (corrección de sesgo) correspondió a los años 1979–2005.

En la Figura 11 se presentan las variaciones porcentuales proyectadas de precipitación para todo Chile según latitud, entre el período histórico y el período futuro 2035–2065, del promedio de los GCM del BHN (línea negra) junto con los percentiles de ARClím. Se observa que, **en la mayor parte del territorio nacional, el promedio de las proyecciones del BHN se encuentra contenido entre los percentiles p25 y p75 de ARClím.**

Figura 11. Proyección de cambio en la precipitación ARClím y BHN



Fuente: SEA, 2023a.

En la Tabla 2 se presenta una comparación entre ARClím y el BHN, donde se muestran las principales diferencias metodológicas entre ambos trabajos, siendo las más importantes el período, método y producto considerado para la corrección de sesgo. Cabe mencionar que no sería pertinente, para efectos de este documento, hacer un análisis de cuál de estas proyecciones es más acertada o de mejor calidad; sin embargo, sí es relevante conocer cuáles fueron las metodologías aplicadas y los resultados obtenidos para efectos de validar un criterio técnico aplicable a la evaluación ambiental.

Tabla 2. Comparación de metodologías ARCLim y BHN

ASPECTO	ARCLIM	BHN
Versiones de GCM	Todos los GCM disponibles en CMIP-5, incluyendo todas las versiones. RCP 8.5	Solo las versiones r1i1p1 de 4 GCM de CMIP-5. RCP 8.5
Cobertura de grilla utilizada	Ajustada a límites político-administrativos de Chile	Ajustada a límites geomorfológicos de Chile
Período de tiempo que cubren las proyecciones	Enero 1970 a diciembre 2070	Abril 1981 a marzo 2060
Producto para corrección de sesgo	CR2Met v2.0	CR2Met v2.5
Período histórico para corrección de sesgo	1979-2018	1979-2005
Método de corrección de sesgo	QM	MCBn

Fuente: SEA, 2023a.



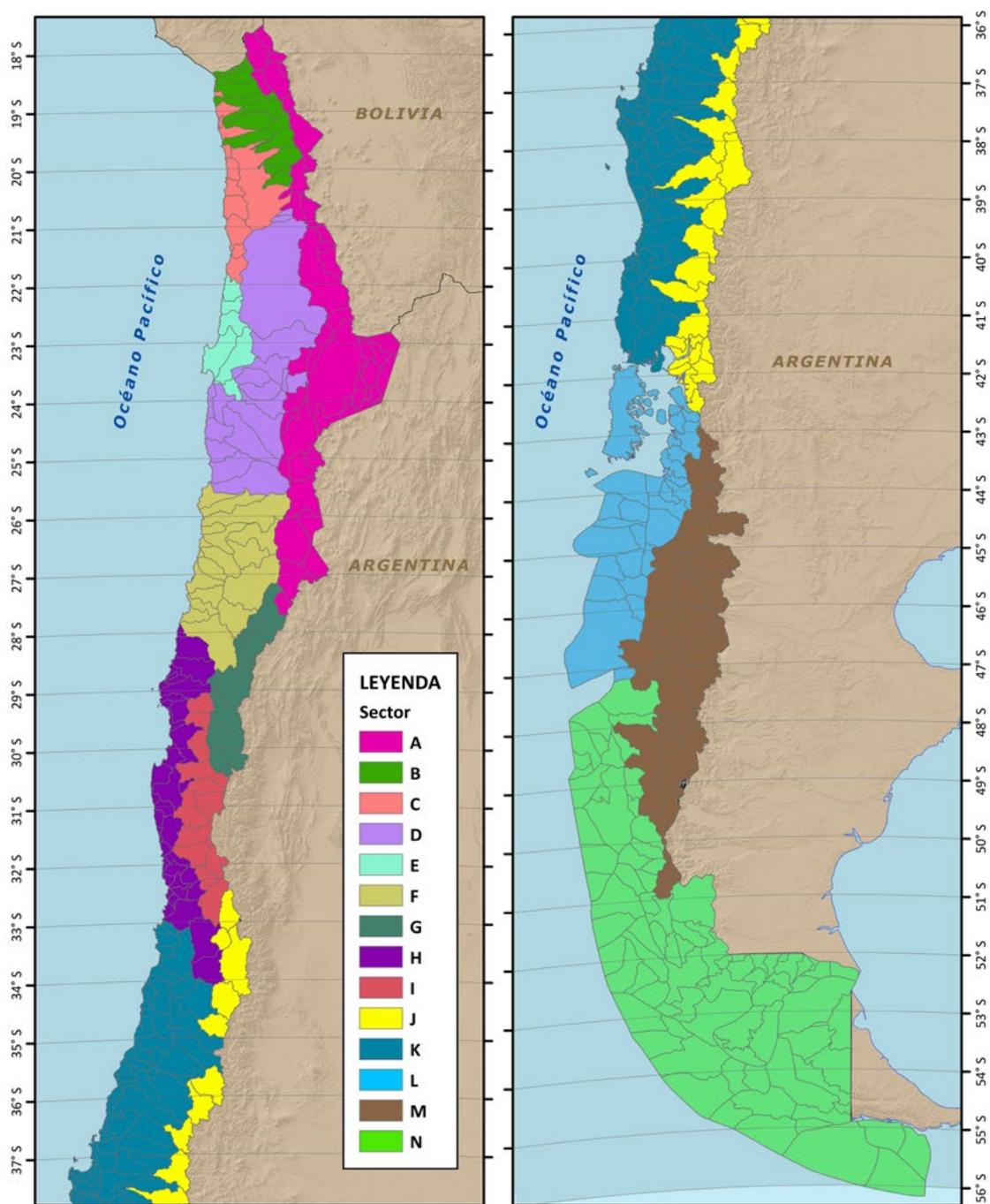
4. VARIACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL SEIA

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, es claro que la estimación de proyecciones de CC está sujeta a variadas fuentes de incertidumbre y que las proyecciones disponibles actualmente arrojan resultados dispares entre sí. Por este motivo, para la utilización de esta información en el SEIA, se requiere establecer un criterio único para su uso.

A continuación se presenta un **criterio simplificado para determinar variaciones de precipitación y temperatura por efecto del CC**. Luego, en la predicción de impactos sobre el componente hídrico, se deberán utilizar estas variaciones para determinar cambios en otras variables del ciclo hidrológico, tales como el caudal, la evapotranspiración, la recarga, entre otros.

Considerando que ciertas zonas tienen un comportamiento similar en términos de proyecciones de precipitación, es que se agrupó y sectorizó el país por subcuencas con el fin de facilitar la comprensión y el uso de los datos (Figura 12). La metodología utilizada para realizar la sectorización se describe en el Anexo A.

Figura 12. Sectorización de proyecciones de precipitación



Fuente: SEA, 2023a.

Para cada uno de estos sectores se establece el **cambio proyectado porcentual** (Tabla 3) entre el período "Histórico" y período "Futuro".

Tabla 3. Valores de cambio porcentual esperado de precipitación según sectorización con respecto al período "Histórico"

SECTOR	ELEVACIÓN MEDIA [MSNM]	CAMBIO EN LA PRECIPITACIÓN (%)	
		P25	P75
A	4.140	-11,6	15,8
B	2.491	-17,6	13,5
C	960	33,7	165,6
D	1.948	-5,5	35,9
E	1.122	2,9	99,0
F	1.160	-24,1	19,8
G	3.459	-23,8	10,0
H	512	-30,5	0,2
I	1.992	-28,5	0,0
J	1.283	-18,8	-8,3
K	292	-20,1	-9,5
L	317	-8,8	-3,3
M	857	-6,8	-1,4
N	312	1,2	6,1

Fuente: SEA, 2023a.

En el caso de la temperatura no fue necesario realizar una sectorización, toda vez que las variaciones en términos absolutos (°C) son homogéneas a lo largo del país. De acuerdo con lo observado en la Figura 10, **se proyecta un incremento de 1,4°C bajo un escenario desfavorable.**

A partir de lo anterior, **se establece como criterio técnico el uso de los valores de la Tabla 3 para estimar el porcentaje de cambio en la precipitación en Chile**, así como también el incremento en la temperatura de 1,4°C bajo las siguientes consideraciones:

- Los valores indicados en la Tabla 3 son porcentajes de cambio de precipitación que deberán ser aplicados sobre los datos estadísticos históricos para obtener la proyección futura, sin necesidad de acceder a la plataforma ARClím.
- **El escenario más desfavorable será el p25 o p75, dependiendo de con cual de estos se produce una mayor magnitud o duración del impacto identificado que se pretende predecir.** Por ejemplo, si se desea predecir el impacto por emisión de residuos líquidos en un cauce superficial, entonces la mayor afectación se generará para un escenario de menor caudal del cuerpo receptor, por lo que se deberá utilizar el p25, para luego estimar justificadamente el caudal del cuerpo receptor. En el caso de que se necesite predecir el impacto por infiltración de aguas de contacto (drenaje ácido), entonces la mayor afectación ocurrirá para un escenario de mayor precipitación, por lo que se deberá utilizar el p75.
- Dentro del Seguimiento Ambiental y Medidas, las actualizaciones de modelos numéricos que hayan quedado comprometidas en la RCA deberán actualizarse según las proyecciones de cambio en la precipitación y temperatura, en consideración de los avances de la ciencia en esta materia o futuras actualizaciones de este documento. Lo anterior no implica que los umbrales que hayan quedado establecidos en la RCA puedan ser modificados¹¹.
- En consideración de que los valores expuestos corresponden a los efectos del CC sobre la magnitud a escala temporal de años, entonces se podrá, justificadamente, utilizar supuestos para determinar variaciones en (i) la magnitud a escalas temporales menores, (ii) frecuencia de eventos o (iii) la estacionalidad, entre otros. A modo de ejemplo, en caso de requerir la estimación de un caudal medio mensual mínimo, entonces se podría asumir que el mes en el que se produce el mínimo es el mismo que en la situación histórica (supuesto iii), y que el porcentaje de cambio para ese mes en particular es el mismo que el indicado en la Tabla 3 (supuesto i).
- También será posible utilizar las alternativas mencionadas en el Anexo B para determinar proyecciones de las variables hidrometeorológicas y abordar los casos específicos planteados en el punto anterior¹².
- En el caso de que la zona de estudio se encuentre entre dos sectores, se sugiere que el porcentaje de cambio se calcule considerando un promedio ponderado según el porcentaje de área de la zona de estudio perteneciente a cada sector.
- En consideración de que los valores corresponden al cambio proyectado porcentual entre el período “Histórico” (1980–2010) y el período “Futuro” (2035–2065), los proyectos que

¹¹ Para más antecedentes sobre el Seguimiento Ambiental, revisar el documento *Criterio de evaluación en el SEIA: Contenidos técnicos para la evaluación ambiental del recurso hídrico*.

¹² En este caso, se deberá verificar que en la temporalidad anual se respeten las variaciones de precipitación y temperatura aquí propuestas.

requieran utilizar valores de precipitación posterior al 2065 podrán usar los mismos valores de la Tabla 3 o las alternativas mencionadas en el Anexo B.

- Es particularmente importante utilizar con criterio los resultados de precipitación que se obtienen en la zona norte del país, donde es posible evidenciar que los sectores C y E proyectan variaciones porcentuales elevadas, algo que podría parecer contra intuitivo al comparar con el resto de los sectores. Estos valores elevados de cambio ocurren debido a que las precipitaciones históricas son valores muy bajos (incluso cercanos a 0 mm/año en algunos sectores), por lo que cualquier aumento proyectado se traduce en una variación porcentual elevada (SEA, 2023a). Por lo tanto, en estos sectores también se deberá presentar la estadística del período histórico de referencia (1980-2010), para así verificar que no sea muy diferente de la estadística actualizada hasta la fecha de presentación al SEIA.

Finalmente, respecto de esta metodología, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El período “Histórico” utilizado en ARClím no considera los últimos años de sequía, por lo que, en el caso de las precipitaciones, al aplicar los valores de la Tabla 3 a la estadística histórica hasta la fecha de presentación al SEIA se obtendrán resultados conservadores cuando la mayor afectación se genere en un escenario de menor precipitación (p25).
- El uso del escenario RCP8.5, considera el más desfavorable desde el punto de vista de las emisiones de GEI, pero no necesariamente generará el peor escenario de precipitación o temperatura para la evaluación de impacto ambiental. Sin embargo, dado que son las proyecciones disponibles de forma oficial, entonces el SEA considerará su uso válido como el escenario más desfavorable.
- En el caso de que ARClím sea actualizado mediante la incorporación de GCM posteriores a CMIP-5, o la consideración de otros escenarios de emisión, entonces la metodología y valores aquí presentados seguirán siendo válidos mientras este documento no sea actualizado.
- El uso de los percentiles p25 y p75, a partir de las proyecciones de ARClím, permite considerar un escenario de cambio climático que, para la mayoría del territorio nacional, es más desfavorable que el promedio de las proyecciones del BHN.

4.1 Ejemplo de aplicación

A continuación se describe un ejemplo de aplicación de las variaciones de precipitación y temperatura propuestas anteriormente.

Caso hipotético: “Proyecto de planta de tratamiento de agua potable”

- a) **Descripción de partes, obras y acciones:** el proyecto consiste en una planta de tratamiento de agua potable, cuya fuente de agua son las aguas subterráneas y que ingresa al SEIA el 2029.
- b) **Identificación de impacto:** alteración de los niveles de agua subterránea, el flujo pasante y el volumen embalsado del acuífero.

c) Caracterización:

1. De acuerdo a la localización del proyecto y al factor generador de impacto (bombeo), se determina que la cuenca que recarga al acuífero es parte de los sectores H e I. A partir de la información geográfica, se calcula que un 90% de la cuenca pertenece al sector H y el 10% restante pertenece al sector I.
2. Se recopila la estadística de precipitaciones de los últimos 30 años, es decir, desde el 2000 al 2029, y se determina una precipitación media anual de 310 mm en la parte de la cuenca perteneciente al sector H y de 330 mm en la parte de la cuenca perteneciente al sector I.
3. **Dado que el escenario más desfavorable ocurrirá para una menor precipitación, puesto que generará una menor recarga del acuífero, el porcentaje de cambio quedará determinado por el percentil p25**, es decir, -30,5% para el sector H, y -28,5% para el sector I.
4. Para obtener valores de precipitación proyectada en un escenario futuro con cambio climático, se multiplica la precipitación anual por el porcentaje de precipitación proyectada. Por lo tanto, se obtiene una precipitación de **215,5 mm (310 mm*(100%-30,5%))** para el sector H y de **236,0 mm (330 mm*(100%-28,5%))** para el sector I. Debido a que el proyecto genera impactos en dos sectores, H e I, se debe proceder luego a la ponderación por área, lo que entrega un resultado final de **217,5 mm (215,5 mm * 90% + 236,0 mm * 10%)¹³**.
5. La temperatura media anual para el período 2000-2029 se estimó en 6°C. Dado que la menor recarga se generará para un escenario de mayor temperatura, la temperatura media anual con cambio climático será de 7.4°C (6.0°C+1.4°C).

d) Predicción de impacto: para la predicción de impactos se requiere de la elaboración de un modelo hidrogeológico, para lo cual se debe estimar la recarga al acuífero que se verá afectada por el efecto del CC sobre las precipitaciones y la temperatura.

1. Mediante un análisis de la estadística histórica de precipitación y niveles de agua subterránea a nivel diario, se concluye que solamente ciertos eventos de precipitación generan recarga, la que se estima en un 7% de la precipitación media anual. Asumiendo que el cambio climático no incide en la magnitud o frecuencia de los eventos diarios, entonces el porcentaje de recarga se mantiene igual. Con ello se obtiene una recarga en la condición futura de 15,2 mm (217,5 mm * 7%)

¹³ De forma alternativa, también el cálculo se puede realizar aplicando los porcentajes de representación de cada sector (90% y 10%) sobre los percentiles de variación de la precipitación esperados (-30,5% y -28,5%). En este caso, el porcentaje de cambio de precipitación ponderado será de -30,3% (-30,5%*90% + -28,5%*10%). En esta alternativa de cálculo luego corresponderá multiplicar el cambio ponderado por la precipitación histórica correspondiente a cada sector (310 mm*(100-30,3%)*90% + 330 mm*(100-30,3%)*10%), lo cual arrojará los mismos resultados finales.

2. De forma alternativa, mediante el método de Turc¹⁴, el cual utiliza como parámetros la precipitación media anual (217,5 mm) y la temperatura media anual (7.4°C), se estimó que la recarga bajo el escenario de cambio climático es de 10 mm.
3. Dado que **el peor escenario (menor recarga) se genera con el método de Turc**, para el modelo numérico hidrogeológico se utiliza una recarga de 10 mm/año en un escenario de cambio climático.

¹⁴ El método de Turc permite estimar la recarga a base de un balance simple entre la precipitación y evapotranspiración en la cuenca. La evapotranspiración es estimada a partir de la propia precipitación y el poder evaporante de la atmósfera en el sector en estudio que, a su vez, se puede estimar a base de la temperatura representativa de la zona.



5. APLICABILIDAD DEL CRITERIO METODOLÓGICO

De acuerdo con lo establecido en la *Guía Metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b), el criterio de decisión para determinar si un proyecto debe considerar el CC en la evaluación ambiental es que **se identifiquen sinergias negativas sobre un mismo componente ambiental por el efecto conjunto entre el CC y los impactos de un proyecto.**

Este criterio es válido para la aplicación de las metodologías propuestas en este documento, donde toma especial relevancia en la identificación de sinergias negativas el analizar **la duración de los efectos del proyecto sobre el medio ambiente.** Cabe destacar que la duración de los efectos puede diferir de la duración de las acciones que lo provocaron, tal como sucede con la extracción de agua subterránea. La lentitud del flujo de aguas subterráneas incide en que los efectos puedan expresarse mucho tiempo después, incluso posterior al cierre del proyecto. Por otro lado, una descarga de residuos líquidos en un cauce superficial genera una alteración que podría terminar al mismo tiempo en que se detiene la descarga sobre el cuerpo receptor.

.....

Si un proyecto y el cambio climático generan un efecto conjunto sobre el recurso hídrico, entonces se deberá incorporar el análisis del efecto del cambio climático para evaluar la significancia de los impactos, lo que implicará incluir los cambios en precipitación y temperatura en el área de influencia.

.....

En consideración de lo anterior, **las DIA y EIA deberán realizar la predicción y evaluación de impactos del proyecto considerando el CC mediante la metodología expuesta en el presente documento**, en los casos que corresponda. La no aplicabilidad de este análisis deberá estar debidamente justificada.

Finalmente, cabe mencionar que **la incorporación del CC en la obtención de los permisos 155, 156, 157, 158 y 159 no será aplicable.** Ello se justifica en que sus normas fundantes, es decir, el Código de Aguas y la Ley N°11.402, no lo consideran.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bürger, G., S. R. Sobie, A. J. Cannon, A. T. Werner, and T. Q. Murdock. 2013. Downscaling extremes: An intercomparison of multiple methods for future climate. *J. Climate*, 26, 3429–3449, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00249.1>.
- Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock., 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Climate*, 28(17), 6938–6959, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., and Aedo, S., 2023. Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>
- CSIRO and Bureau of Meteorology 2015, *Climate Change in Australia Information for Australia's Natural Resource Management Regions: Technical Report*, CSIRO and Bureau of Meteorology, Australia.
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DGA, 2022. "Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile". SIT N°524. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- IPCC, 2013. "Resumen para responsables de políticas. En *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*" [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- NOAA, 2012. Descripción del primer modelo climático basado en interacciones entre el océano y la atmósfera. Publicación *web* disponible en https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/welcome.html

- Pica-Téllez, A.; Garreaud, R.; Meza, F.; Bustos, S.; Falvey, M.; Ibarra, M.; Duarte, K.; Ormazábal, R.; Dittborn, R. & Silva, I.; 2020. Informe Proyecto ARCLim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago, Chile.
- SEA, 2023a. Consultoría para la Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico. Servicio de Evaluación Ambiental, División de Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana, Santiago, Chile. Elaborado por: Hídrica Consultores SpA.
- SEA, 2023b. Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA. Primera edición, Servicio de Evaluación Ambiental, Santiago, Chile. Disponible en el Centro de Documentación del sitio *web* del SEA, www.sea.gob.cl
- Switanek, B. M., Troch, P., Castro, L. C., Leuprecht, A., Chang, H. I., Mukherjee, R., and Demaria, M. C. E., 2017. Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology & Earth System Sciences*, 21, 2649–2666, <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>.
- Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumar and D. P. Lettenmaier, 2002: Long-Range Experimental Hydrological Forecasting for the Eastern United States. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 107(D20), <https://doi.org/10.1029/2001JD000659>.



1. ANEXO A. Metodología de agrupación

Para realizar la sectorización territorial de las proyecciones de ARClím, se utilizó la herramienta *Spatially Constrained Multivariate Clustering*, disponible en el *software* ArcGIS. Esta herramienta corresponde a una técnica de *clustering* o agrupación, que utiliza métodos de *machine learning*, considerados no supervisados, puesto que no requieren un conjunto de características preclasificadas para guiar o entrenar a determinar la agrupación de datos.

A partir de una cantidad de *clusters* (agrupación) a crear, la herramienta busca una solución en la que todas las características dentro de cada *cluster* sean lo más similares posible, y que los *clusters* sean lo más diferentes entre sí, de acuerdo a las características seleccionadas. Entonces, el algoritmo utilizado emplea un gráfico de conectividad o árbol de expansión mínimo llamado SKATER para encontrar grupos y evaluar la probabilidad de pertenencia a cada grupo. Las consideraciones utilizadas para realizar la sectorización fueron las siguientes:

- **Uso de subcuencas como unidad espacial:** La unidad de trabajo durante este estudio fue la subcuenca, por lo que, para efectos de realizar la sectorización de las variables precipitación y temperatura, la agrupación fue realizada a partir de éstas. La herramienta utilizada considera la información proyectada en cada una de las subcuencas y las agrupa considerando los criterios definidos.
- **Cercanía:** Uno de los factores que considera la agrupación y que es parte de las consideraciones propias del algoritmo utilizado, es que la sectorización se realice a partir de subcuencas que se encuentren geográficamente cercanas.
- **Valores de p25 y p75:** Dentro de los criterios utilizados se consideró que la sectorización cumpla con agrupar subcuencas donde los percentiles 25 y 75 de las variaciones proyectadas sean similares. Estos percentiles corresponden a los establecidos como la envolvente de las proyecciones para las distintas variables, explicado con más detalle en la sección 3.1.1. De esta forma la sectorización permite identificar las zonas que mantienen proyecciones

similares, tanto para las variaciones proyectadas en p25 como p75, manteniendo así una envolvente similar.

- **Ventanas de tiempo:** Adicionalmente, la sectorización considera sectores que mantengan una envolvente similar para las distintas ventanas de comparación utilizadas (2015–2045, 2025–2055 y 2035–2065, respecto a 1980–2010). De esta forma la agrupación identifica aquellas subcuencas que proyectan una variación similar, tanto en tiempo como en espacio.
- **Elevación:** De manera complementaria a que la sectorización considere subcuencas cercanas y variaciones proyectadas similares, ésta además incluye la categorización por elevación (m.s.n.m.). Se incorpora, entonces, en la sectorización la variabilidad en función de la elevación como parte de los criterios adoptados.
- **Refinamiento final:** Finalmente, una vez realizada la sectorización, considerando los criterios mencionados, se verificó que ésta fuese razonable y concordante con los criterios adoptados. Se realizó una pequeña corrección con aquellas subcuencas que presentan proyecciones muy distintas al resto de subcuencas y, por lo tanto, para efectos del algoritmo son asignadas por sí solas a un único sector. Estos casos son mencionados en la presentación de la sectorización establecida.

En consecuencia, una vez realizada la sectorización, se determinaron los valores de la envolvente y valor esperado considerando una ponderación por área de las subcuencas de cada sector. Así, para cada uno se definieron las proyecciones de cambio esperado tanto en p25 como p75, estableciendo así la envolvente, para cada ventana de tiempo. Finalmente, de manera complementaria y utilizando la misma forma de cálculo, se definió el valor medio esperado como el promedio de las proyecciones que se encuentran dentro de la envolvente p25 a p75. Esto permitió omitir aquellas proyecciones que se encuentran más alejadas de la tendencia general de los GCM y no afectar la estimación al momento de establecer la media.



2. ANEXO B. Alternativas para obtención de variables hidrometeorológicas bajo escenarios de CC

2.1 Proyecciones propias

De forma similar a lo descrito en el marco conceptual del acápite 2, otra forma de considerar los efectos del CC es mediante la estimación de proyecciones propias, lo que puede ser particularmente necesario cuando se requiere proyectar el comportamiento de **(i) las precipitaciones a escalas temporales menores, (ii) considerar el cambio en la frecuencia de eventos o (iii) la estacionalidad**, entre otros. Para ello se entregan las siguientes directrices.

- **Escenarios y GCM**

Se podrán realizar proyecciones de CC mediante el uso de GCM del CMIP-6 (o posterior), los cuales cuentan con una cobertura temporal de 1850 a 2014 para los datos históricos y de 2015 a 2100 para proyecciones según escenarios SSPx-y. Se recomienda utilizar al menos dos escenarios, siendo uno desfavorable (SSP5-8.5) y otro menos desfavorable (SSP2-4.5) en términos de emisiones, para luego seleccionar el resultado que genere la mayor alteración sobre el recurso hídrico.

Se sugiere que la elección de los GCM que se van a utilizar se base en algún análisis previo que fundamente su elección. Los resultados obtenidos representarán diferentes condiciones futuras proyectadas, lo que se debe analizar considerando diferentes escenarios con distinto impacto, siempre evaluando como parte del análisis una situación desfavorable. Para la determinación de los valores que se usarán en la evaluación ambiental, se podrá utilizar algún criterio estadístico, similar a lo realizado con la metodología ARClm.

- **Escalamiento espacial**

Respecto de la corrección del escalamiento (*downscaling*), se recomienda utilizar alguno de los siguientes; MBCn (Cannon et al., 2016), UQM (Chadwick et al., 2023), QDM (Cannon et al., 2015), SDM (Switanek et al., 2017), DQM (Bürger et al., 2013), QM (Wood et al., 2002).

- **Corrección de sesgo**

Se recomienda evaluar el método apropiado para realizar el proceso de corrección de sesgo según las necesidades del estudio y la evidencia respectiva sobre el uso de cada método. Adicionalmente, se sugiere que la corrección de sesgo se realice con información histórica sólo para el período histórico de los modelos, es decir, hasta 2014 para el caso de los GCM del CMIP-6. De este modo se evita la posible influencia de variaciones de los estadísticos en las proyecciones como parte del ajuste a la información observada.

Para realizar la corrección de sesgo se debe utilizar información observada para adoptar las tendencias y proyecciones de los GCM al comportamiento local. Para realizar esta corrección, es importante que la información utilizada represente lo ocurrido históricamente. En este sentido, una fuente de información ampliamente utilizada en Chile para la corrección de sesgo de las variables de precipitación y temperatura son los productos CR2Met, que cuentan con distintas actualizaciones, siendo la más reciente la versión 2.5. Sin embargo, es importante notar que la corrección de sesgo para los GCM del CMIP-6 debiese realizarse con información hasta 2014, correspondiente al período histórico de estos. Por lo tanto, las versiones 1.4, 2.0 y 2.5 podrían ser utilizadas para este propósito, al poseer información más allá del 2014.

De forma alternativa al CR2Met, se podrá generar un producto grillado propio con información local observada que represente de buena forma la situación local. Ello se recomienda principalmente en zonas donde existe mayor sesgo o se dispone de información adicional a la utilizada en la generación de los productos CR2Met, como por ejemplo en el norte del país.

- **Temporalidad**

La información de los GCM se dispone de manera diaria y mensual, por lo que se sugiere que se trabaje con una escala determinada según los objetivos del estudio específico. Esto debido principalmente a que usar la información a una escala diaria puede significar un gran trabajo adicional al utilizar diversos GCM. Por lo tanto, se recomienda definir apropiadamente la escala temporal sobre la que se utilizarán estas proyecciones.

Por otro lado, es importante tomar en consideración que los resultados del análisis de las proyecciones climáticas dependerán de las ventanas "Histórica" y "Futura" consideradas. En este sentido, se recomienda evaluar ventanas temporales de igual longitud en caso de analizar brechas o cambios esperados. Se recomienda utilizar períodos de al menos 30 años para la caracterización de condiciones particulares.

2.2 Balance Hídrico Nacional

El Balance Hídrico Nacional, en su última versión, correspondiente al estudio “Homologación del Cálculo Hidrológico para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile” (DGA, 2022), provee de una fundamentación metodológica consistente, lo que lo convierte en una fuente factible para analizar escenarios futuros mediante cambios esperados y evolución de los componentes hídricos.

