

**“CONSULTORÍA SOBRE INFRAESTRUCTURA ECOLÓGICA Y RIESGO DE
DESASTRES EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO, PARA LA PROVINCIA DE
CONCEPCIÓN”**

CAPÍTULO 1

**ANTECEDENTES GENERALES
Y CAMBIO CLIMÁTICO**

Concepción, 09 de julio 2024

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS DE LA CONSULTORÍA.....	2
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3. ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
4. ESTRUCTURA METODOLÓGICA GENERAL	16
5. CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN.....	17
5.1. DATOS HISTÓRICOS.....	17
5.2. DATOS PROYECTADOS.....	25
6. REFERENCIAS.....	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de Estudio, Provincia de Concepción.....	4
Figura 2. Porcentaje de Uso de suelo por categoría en la Provincia de Concepción.....	4
Figura 3. Usos y Coberturas de suelo Provincia de Concepción.....	5
Figura 4. Mapa geológico de la Provincia de Concepción.	9
Figura 5. Cuencas hidrográficas de la Provincia de Concepción.....	12
Figura 6. Profundidad del Nivel Estático en meses invernales en distintos puntos de la provincia de Concepción.....	13
Figura 7. Permeabilidad de las unidades geológicas presentes en la Provincia de Concepción.	14
Figura 8. Permeabilidad Acuífero Cuenca Biobío.....	15
Figura 9. Propuesta de integración metodológica de los principales componentes y etapas del estudio de infraestructura ecológica y riesgo de desastres en un escenario de cambio climático, para la Provincia de Concepción.	16
Figura 10. Precipitaciones anuales promedio (mm) para el periodo actual 1993–2022, para el periodo 2031–2060 y porcentaje de variación para distintos MCG (de izquierda a derecha: CCSMA4, IPLS, MIROC).....	27
Figura 11. Temperatura máxima promedio para el periodo actual 1993–2022, para el periodo 2031–2060 y su variación para distintos MCG (de arriba hacia abajo: CCSMA4, CSIRO, IPLS, MIROC).....	28

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coberturas de suelo afectadas por incendios.	6
Tabla 2. Población Comunal, Provincia de Concepción.	7
Tabla 3. Estaciones meteorológicas.	17
Tabla 4. Estaciones fluviométricas.	17
Tabla 5. Análisis de disponibilidad de datos, Estaciones Meteorológicas	19
Tabla 6. Análisis de disponibilidad de datos, Estaciones Fluviométricas.	20
Tabla 7. Periodos de retorno para estaciones fluviométricas (caudal).....	21
Tabla 8. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Precipitación)	21
Tabla 9. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Temperatura media).	22
Tabla 10. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Temperatura máxima).....	22
Tabla 11. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Temperatura mínima).	22
Tabla 12. Resultados de pruebas de tendencia para caudales.....	24
Tabla 13. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (precipitación anual).....	24
Tabla 14. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (temperatura media).....	25
Tabla 15. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (temperatura máxima).....	25
Tabla 16. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (temperatura mínima)	25
Tabla 17. Índices relacionados con amenazas producto de temperaturas, viento y precipitación.	29

1. INTRODUCCIÓN

El territorio chileno enfrenta diversas amenazas, tanto naturales como antrópicas. Además, la fragilidad en la ocupación del territorio puede dar lugar a eventos catastróficos que afectan la economía, las infraestructuras y la calidad de vida de la población. Particularmente, en las últimas décadas destacan múltiples eventos desastrosos, como las erupciones del volcán Chaitén (2008), Cordón Caulle (2011), los terremotos tsunamigénicos del Maule (2010) e Illapel (2015), el aluvión de Chañaral (2015), los incendios forestales y las inundaciones fluviales en la zona central de Chile (2023, 2024). Además, se suman eventos de acción constante, como la extensa sequía que afecta al territorio desde el año 2008.

Es fundamental abordar estas problemáticas mediante una visión holística que considere las distintas fases de la gestión del riesgo con enfoques modernos para reducirlo. Una de las principales vías para alcanzar dicho objetivo, se asocia con el fortalecimiento de la Planificación Territorial y los estudios de riesgo que la sustentan, estos deben ser capaces de entregar información para dimensionar los impactos de eventuales desastres que permitan a los tomadores de decisiones considerarlos como estrategias de desarrollo (Arenas et al., 2010; Rinaldi & Bergamini, 2020; Rojas et al., 2017). Aspecto relevante, ante los retos que supone el crecimiento económico, el aumento de la población y el cambio climático.

En una visión moderna, la reducción del riesgo en países desarrollados y en vías de desarrollo ha comenzado a migrar desde los métodos tradicionales (ej. Infraestructura gris) que implican un elevado costo y fuertes impactos ambientales (Rojas et al., 2022), a enfoques verdes o híbridos que tienen una mayor visión ecosistémica para disminuir el nivel de las amenazas, y adicionalmente contribuyen a mantener la biodiversidad asegurando la provisión de múltiples servicios ecosistémicos. Aquí cobra relevancia el concepto de infraestructura ecológica (IE) entendida como “una red estratégicamente planeada de áreas naturales y semi-naturales diseñada y manejada que mantienen procesos ecológicos naturales, y contribuyen a la salud y calidad de vida de las comunidades y pueblos” (Benedict & McMahon, 2022)”, que debe ser identificada y caracterizada para su valoración.

Un cambio de paradigma se impulsa en Chile, desde las nuevas agendas nacionales e internacionales que apuntan a relevar la visión ecosistémica basado en el enfoque de servicios ecosistémicos. El ingreso en OCDE el año 2010, trajo consigo un conjunto de objetivos y dificultades. Entre ellos, que la sostenibilidad ecológica requiere la planificación y ejecución de estrategias que cubran muchos aspectos de las políticas públicas. En 2016, Chile fue evaluado por segunda vez por la OCDE con respecto a los avances en su política ambiental, como resultado de este proceso, el país recibió 54 recomendaciones que apuntaban a mejorar su gestión ambiental y promover un enfoque más sostenible.

El fortalecimiento institucional en temáticas de biodiversidad y la planificación estratégica de las políticas de desarrollo ha habilitado importantes mecanismos para diseñar herramientas de planificación. Uno de los avances más recientes en materia institucional es la Ley Marco de Cambio Climático (2022) que impuso nuevos desafíos de planificación en términos de biodiversidad y capacidad adaptativa. Mediante la norma se incorpora la variable Cambio Climático dentro de procesos de Evaluación Ambiental Estratégica. Para ello, será necesario la colecta y el análisis de información para la toma de decisiones. Esto se suma a otros instrumentos institucionales de planificación estratégica, como la Estrategia Regional de Desarrollo 2015-2030 del Biobío que establece en una de sus líneas de acción: "Fortalecer la

planificación y gestión de riesgos de desastres en las ciudades de la región, para proteger la vida de las personas y mitigar los eventuales impactos que puedan afectar la competitividad".

Así entonces, el presente informe contribuye con el estudio y vínculo de dos grandes componentes, asociadas con el diseño de la infraestructura ecológica y el estudio del riesgo de desastres a escala metropolitana en la provincia de Concepción, considerando escenarios de Cambio Climático que inciden en su dinámica. Las propuestas se realizarán según las experiencias internacionales y la normativa nacional vigente que incluye la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, así como otros cuerpos normativos. La información generada servirá de base e insumo para la elaboración de la Imagen Objetivo del PRMC y otros instrumentos orientados a planificar el territorio, reducir el riesgo y la protección ambiental.

La entrega de resultados de la Etapa 2 de la consultoría se estructura en 5 capítulos:

- Capítulo 1: Antecedentes y cambio climático.
- Capítulo 2: Componente de Amenazas y riesgo de desastres.
- Capítulo 3: Componente de Infraestructura ecológica.
- Capítulo 4: Mapeo de actores claves y participación.
- Capítulo 5: Propuestas y recomendaciones para la imagen objetivo.

El presente capítulo 1, presenta los objetivos y los antecedentes generales transversales a las componentes, como la descripción del área de estudio y el análisis de cambio climático general para la provincia de Concepción, que serán insumos para el desarrollo de los componentes profundizados en los próximos capítulos.

Los capítulos 2 al 5 se han estructurado exponiendo los antecedentes, marco metodológico, resultados, conclusiones, bibliografía y anexos. Es relevante indicar que los marcos metodológicos expuestos corresponden a una síntesis de los procesos desarrollados, los antecedentes específicos deben ser consultados en los informes de la Etapa 1 de la consultoría.

2. OBJETIVOS DE LA CONSULTORÍA

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar la infraestructura ecológica, y estudiar y caracterizar el riesgo de desastres a escala metropolitana presente en la provincia de Concepción, frente a distintos escenarios de Cambio Climático, con el propósito de establecer propuestas y recomendaciones que servirán de base e insumo para la elaboración de la Imagen Objetivo del PRMC y otros instrumentos; la información generada contribuirá a la toma de decisiones en planificación territorial, a la reducción del riesgo de desastres y la protección ambiental.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar y evaluar antecedentes e información disponible, considerando la recopilación y análisis de instrumentos, estudios o investigaciones académicas y/o de organismos públicos, así como también, levantando información de campo, necesaria para el diseño de la Infraestructura Ecológica y Riesgo de desastres con énfasis en la definición de las amenazas.

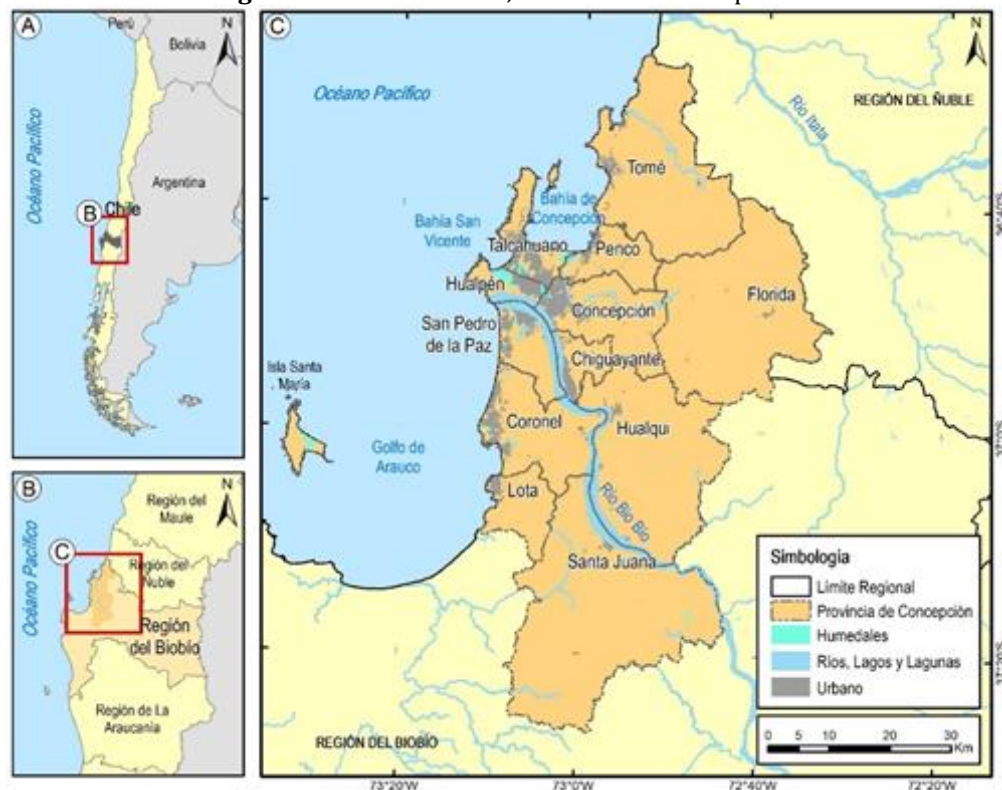
2. Identificar vacíos de datos o brechas de información, para proponer estudios futuros que permitan profundizar en las amenazas y riesgos existentes o incorporar otras nuevas, en la planificación territorial metropolitana.
3. Definir y aplicar distintos escenarios de cambio climático en la planificación territorial, que sirva de base para la identificación de opciones de desarrollo y la elaboración de la Imagen Objetivo del PRMC.
4. Identificar, caracterizar y proponer la Infraestructura Ecológica que reconozca las áreas de valor ecológico, áreas de conectividad biológica y áreas de amortiguación que requieran de protección, manejo y restauración para mantener y recuperar la integridad ecológica y la provisión de los servicios ecosistémicos esenciales para la población frente a los distintos escenarios.
5. Caracterizar la situación actual y evolución futura del riesgo de desastres con énfasis en las amenazas naturales y antrópicas frente a distintos escenarios de Cambio Climático, generando propuestas que contribuyan a la adaptación al mismo y a la mitigación y reducción del riesgo de desastres.
6. Desarrollar propuestas y/o recomendaciones para la planificación territorial a escala metropolitana, que permitan establecer medidas preventivas, correctivas y/o reductivas para la gestión del riesgo de desastres, considerando la Infraestructura Ecológica propuesta.
7. Colaborar con el consultor a cargo de la elaboración de la Imagen Objetivo del PRMC para evaluar y hacer recomendaciones integradas para su desarrollo.
8. Organizar y entregar, al mandante, la información del análisis, diagnóstico y propuestas mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfica SIG, que permita centralizar, georreferenciar y cartografiar toda la Información y sus resultados.
9. Comunicar y/o validar los avances, información recopilada y medidas propuestas, haciendo uso de un lenguaje claro, con la ciudadanía, organizaciones o grupos de Interés, así como también, mediante la coordinación con organismos públicos con competencias en planificación territorial y la gestión del riesgo de desastres.

3. ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación, se describen aspectos que caracterizan el área de estudio asociados al medio físico y humano. La provincia de Concepción ($36^{\circ}27'$ a $37^{\circ}26'$ Sur) se encuentra ubicada al Oeste de la Región del Biobío y sus límites son al Norte la región de Ñuble, al Este, la Región de Ñuble y Provincia de Biobío, al Sur las Provincia de Arauco y de Biobío y al Oeste el océano Pacífico (**Figura 1**). Posee una superficie aproximada de 347.104 ha (Subdere, 2017, en MINVU, 2023) lo que corresponde a un 15,5% de la Región del Biobío. En ella se encuentra la segunda área metropolitana más poblada en Chile y la de mayor importancia demográfica y económica de la región conocida como Área Metropolitana de Concepción (AMC) (Salinas y Pérez, 2011).

La provincia se integra por 12 comunas: Tomé, Penco, Talcahuano, Concepción, Chiguayante, Florida, Hualqui, Hualpén, Santa Juana, San Pedro de la Paz, Coronel y Lota.

Figura 1. Área de Estudio, Provincia de Concepción.



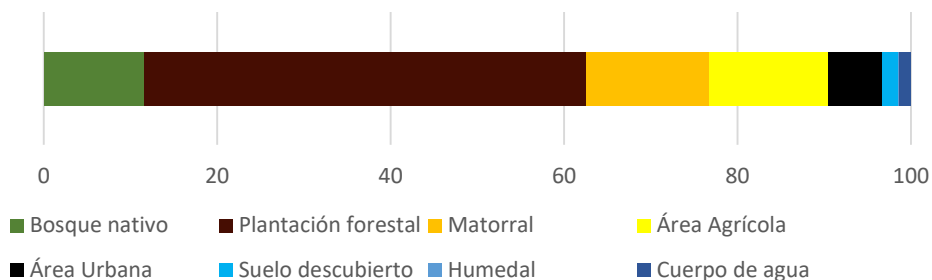
Fuente: Elaboración propia.

• Usos de Suelo

La forma de ocupación del suelo en la Provincia de Concepción está orientada principalmente hacia la actividad forestal, ampliamente distribuida en la Cordillera de la Costa y alcanzando más del 50% (190.415 Ha) de la superficie provincial (**Figura 2 y Figura 3**).

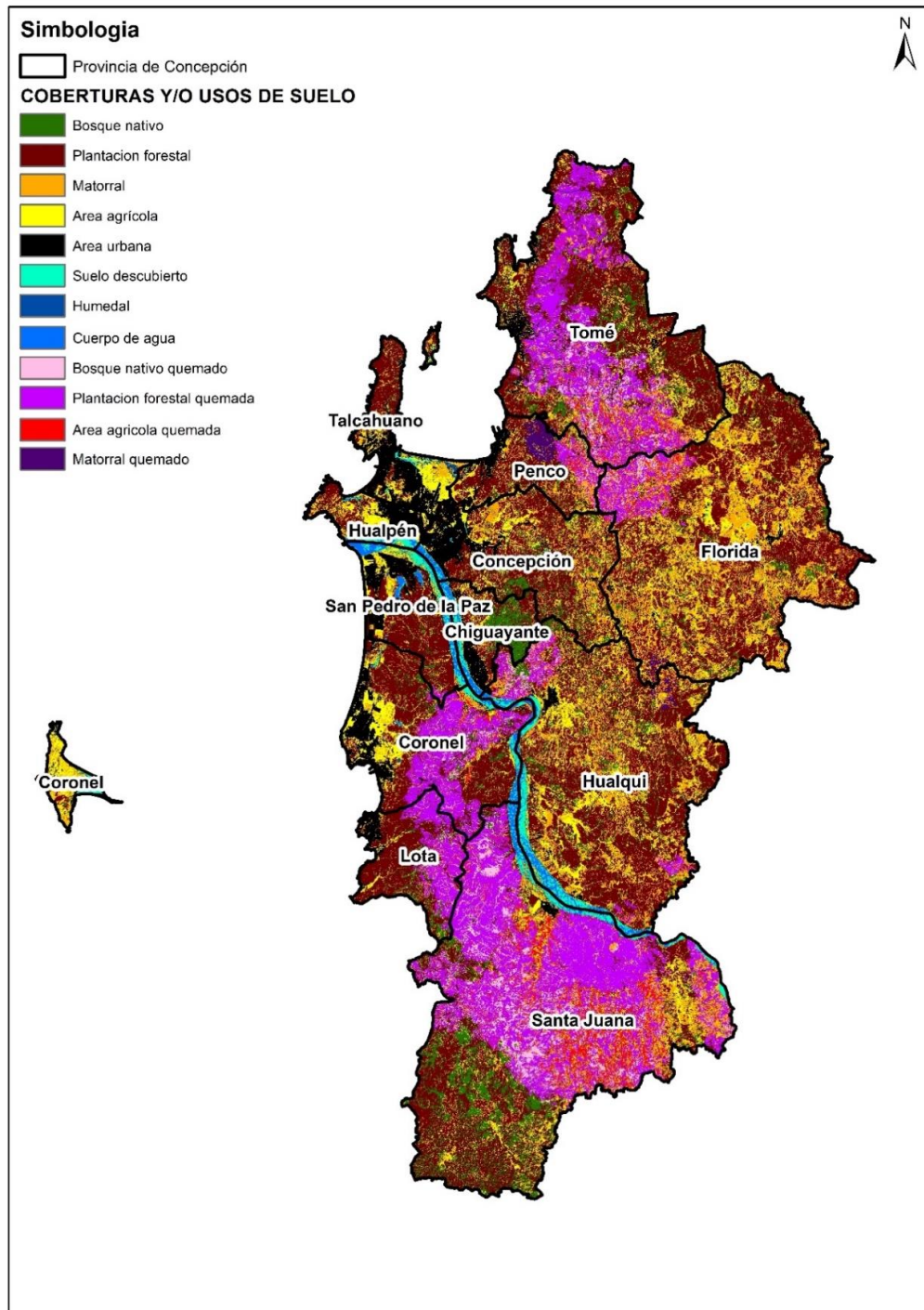
La segunda categoría con mayor superficie corresponde a matorrales (11% - 37.731 Ha) que se emplazan principalmente en la Cordillera de la Costa en las comunas de Tomé, Florida, Hualqui y Santa Juana. Respecto al bosque nativo, solo un 8,5% (29.472 Ha) de la provincia mantiene esta categoría, con la comuna de Santa Juana aportando cerca del 40% dichas superficies (11.484 Ha).

Figura 2. Porcentaje de Uso de suelo por categoría en la Provincia de Concepción



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Usos y Coberturas de suelo Provincia de Concepción.



Fuente: Elaboración propia a partir de clasificación supervisada de imágenes Sentinel 2.

Por otra parte, el uso urbano alcanza el 6,2% del total provincial, concentrándose principalmente en terrenos de baja pendiente de las comunas costeras como Concepción, Talcahuano y San Pedro de la Paz, que en las últimas dos décadas se han visto sometidas a un fuerte incremento de su población que ha expandido la mancha urbana y formado la conurbación que hoy conocemos como Gran Concepción (Smith y Romero, 2009). Es importante considerar que este porcentaje corresponde al resultado de la clasificación de una

imagen satelital del año 2023, es decir, representa específicamente la superficie de sitios con coberturas de suelo urbana, tales como casas, carreteras, infraestructura industrial, etc. Por ello, este valor podría diferir con cifras oficiales de otros documentos o instrumentos, como los polígonos urbanos oficiales considerados en instrumentos de planificación, así como también con resultados de otros estudios, como el de la Consultoría para la Imagen Objetivo del PRMC.

- **Usos de Suelo afectados por incendios forestales**

En el marco de la IE y los riesgos y considerando la provisión de servicios ecosistémicos, resulta muy relevante incorporar las áreas incendiadas y separarlas de otras clases de coberturas, debido a que estas pierden la capacidad de proveer estos servicios, o bien, disminuyen la magnitud en la cual son provistos. En base al porcentaje de superficie provincial afectada por incendios forestales (**Figura 3**), el bosque nativo fue el que más afectación presentó, ya que un 33,9% de su superficie total presentó algún grado de severidad producto de estos incendios. En segundo lugar, las plantaciones forestales se vieron afectadas en un 28,7% respecto a la superficie total que cubren en la provincia. Las otras coberturas y/o usos de suelo afectadas correspondieron a zonas agrícolas (23,9% del total), matorrales (21,9% del total) y, en menor medida, zonas urbanas y humedales, con porcentajes que no superan el 5% de su superficie total (**Figura 3 y Tabla 1**).

Tabla 1. Coberturas de suelo afectadas por incendios.

Cobertura	Sup. total (ha)	Sup. quemada (ha)	% quemado
Bosque nativo	40.334,3	13.675,3	33,9
Plantaciones forestales	176.955,9	50.887,3	28,7
Matorrales	49.239,4	10.771,3	21,8
Agrícola	47.757,4	11.404,1	23,8
Urbano	21.661,9	959,6	4,4
Suelo descubierto	6.336,8	55,7	0,8
Humedal	415,6	18,5	4,4

Fuente: Elaboración propia.

- **Población**

Según los datos del último Censo de Población y Vivienda (2017) en la provincia de Concepción viven cerca de un 1 millón de personas (995.658 habitantes) lo que corresponde a un 63% del total de población en la región del Biobío (**Tabla 2**).

La mayor cantidad de población y viviendas se concentran en las comunas de Concepción (22,5%), Talcahuano (15,2%) y San Pedro de la Paz (13,2%), comunas consideradas parte del núcleo del AMC. Otro aspecto por destacar es el alto porcentaje de población urbana, con comunas que alcanzan casi el 100%, por el contrario, las comunas con mayor porcentaje de ruralidad son Florida (57%) y Santa Juana (30%). La población que se sienten pertenecientes a pueblos originarios oscila entre 4 y 12% para las 12 comunas, siendo las comunas más cercanas a Arauco las que presentan los porcentajes más altos (Coronel y Lota) y aquellas más alejadas exhiben un menor porcentaje (Florida y Tomé).

Tabla 2. Población Comunal, Provincia de Concepción.

Comuna	Población Comunal	(%)	Población Urbana (%)	Población Rural (%)	Viviendas	Pueblos originarios (%)
Chiguayante	85.938	8,6	99,9	0,1	28.959	9
Concepción	223.574	22,5	98	2	85.638	9
Coronel	116.262	11,7	97,3	2,7	41.175	12
Florida	10.624	1,1	42,9	57,1	5.172	4
Hualpén	91.773	9,2	99,1	0,9	30.722	9
Hualqui	24.333	2,4	85,8	14,2	9.031	8
Lota	43.535	4,4	99,8	0,2	15.489	12
Penco	47.367	4,8	99,0	1,0	15.834	9
San Pedro de la Paz	131.808	13,2	99,9	0,1	47.511	10
Santa Juana	13.749	1,4	69,8	30,2	6.219	9
Talcahuano	151.749	15,2	99,1	0,9	50.599	8
Tomé	54.946	5,5	90,2	9,8	23.323	7
Total Provincial	995.658	-	-	-	359.672	-
Total Regional	1.556.805	-	88,6	11,4	573.572	11

Fuente: Elaboración propia con datos de INE (2017).

- **Clima**

El área se encuentra dentro del dominio de climas templados mediterráneos, con estación invernal lluviosa y una estación estival seca y cálida. Las precipitaciones muestran un gradiente latitudinal y longitudinal diferenciando el sector costero del cordillerano. Por ejemplo, en la comuna de Talcahuano se reportan en promedio 1.000 mm anuales, mientras que en la Cordillera de la Costa el monto aumenta a 1.600 mm asociados al efecto orográfico, al sur del río Biobío las mayores altitudes de la Cordillera de Nahuelbuta explican pluviometrías del orden de 2.000 mm anuales (IGM, 2001). Son las condiciones pluviométricas, el principal detonante para algunas amenazas naturales en el sector, tales como: anegamiento, remociones en masa, anegamientos e inundación fluvial (Mardones y Vidal, 2001).

- **Medio Físico**

Geomorfológicamente la Provincia de Concepción se emplaza sobre dos de las principales macroformas de relieve que dominan el territorio occidental de Chile continental, al este con la Cordillera de la Costa que en Santa Juana alcanza altitudes por sobre los 700 m sobre el nivel del mar, pero también sobre un tramo abrasivo de bahías cerradas, con desarrollo de planicies y plataformas litorales (Instituto Geográfico Militar, 2001); el AMC tiene un fuerte desarrollo sobre el área litoral de 60 km que tiene como eje central la desembocadura del río Bío-Bío pero que también se encuentra seccionado por otros ríos de origen costero como el Andalién (Mardones y Vidal, 2001). En la costa destacan los sistemas lacustres, de humedales y dunares remanentes los que se encuentran presionados por el desarrollo urbano (Rojas et al., 2019; Munizaga et al., 2022).

- **Geología**

La descripción de detalle de las unidades litológicas presentes en la Provincia de Concepción se caracteriza desde la unidad más antigua a la más reciente, de acuerdo con la compilación de las descripciones presentes en la Hoja de Concepción-Chillán (Gajardo, 1981), en conjunto con distintos estudios de la DGA (2011, 2012) y diversas publicaciones científicas (**Figura 4**).

Unidades intrusivas y metamórficas

Basamento granítico Paleozoico Superior: Unidad descrita informalmente como Batolito de la Costa por Gonzalez-Bonorino (1970 en Gajardo, 1981). Por relaciones estratigráficas se le otorga una edad Paleozoico superior – Triásico Inferior, lo cual coincide con sus dataciones que señalan 320 Ma como edad de cristalización, y 208 y 218 Ma como edad de enfriamiento por exhumación (Hervé, 1976 en Gajardo, 1981). Esta unidad da origen a gran parte del relieve de las serranías intermedias (poniente de la depresión intermedia) con una extensión dominante N-S con alturas medias de 600 a 800 m s.n.m. (DGA, 2011).

El complejo plutónico se caracteriza por presentar composiciones principalmente entre tonalita y granodiorita con sectores menos extensos de diorita cuarcífera y granito (Gonzalez-Bonorino, 1970 y Hervé et al., 1976 en Gajardo, 1981). Estas rocas han sido sometidas a intensos fenómenos cataclásticos, lo cual se evidencia en el fracturamiento de sus cristales de cuarzo y feldespato. Esta unidad se encuentra en relación de contacto por intrusión con el Basamento Metamórfico, e infrayace en discordancia por erosión a las rocas triásicas (Gajardo, 1981).

Intrusivos cretácicos: Unidad que comprende Intrusiones dioríticas y monzodioríticas de piroxenos y hornblenda, con presencia menor de granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. Se ubican en la zona oriental de la Cordillera de la Costa en una franja con orientación NNE-SSW y representan altos topográficos (DGA, 2011).

Basamento Metamórfico: La designación de Basamento Metamórfico, para caracterizar a las rocas metamórficas que afloran en la región costera de Chile Central, fue empleada por Gonzalez-Bonorino (1970), quien agrupó estas rocas, de acuerdo con su grado de metamorfismo, en series metamórficas caracterizadas por valores particulares de presión y temperatura. Aguirre et al. (1972), en base a antecedentes estructurales y litológicos, definieron para el Basamento Metamórfico la Serie Oriental, caracterizada por un metamorfismo de baja presión/alta temperatura y la Serie Occidental, producto de un metamorfismo de alta presión/baja temperatura.

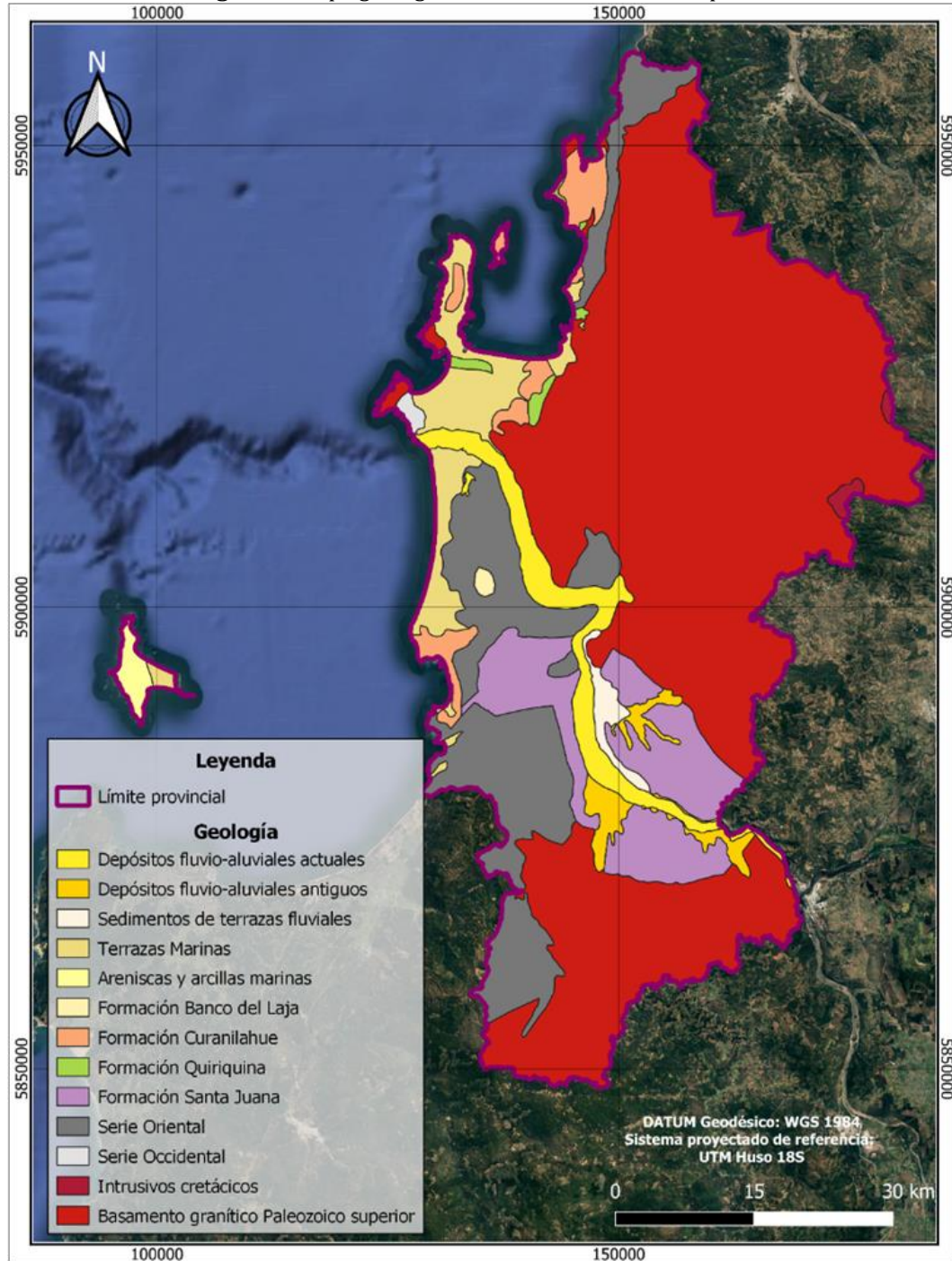
La base de esta unidad es desconocida y su techo lo constituyen, parcialmente, las unidades estratificadas que corresponden a rocas sedimentarias del Cretácico y Terciario, que la sobreyacen en discordancia angular y de erosión.

Serie Occidental del Basamento Metamórfico (Silúrico – Carbonífero): Se reconocen dos unidades dentro de la Serie Occidental, la Unidad Nahuelbuta está constituida fundamentalmente por esquistos micáceos grises, metacherts ferruginosos y bandas sulfuradas locales; y la Unidad Tirúa, compuesta por esquistos verdes, micáceos y metacherts manganíferos. Además, existen diversos cuerpos ultramáficos serpentinizados (Hervé, 1977). El protolito de esta serie ha sido identificado como basaltos y secuencias pelíticas de fondo oceánico con corteza oceánica, afectada por metamorfismo de alto P/T que ocurre durante el Devónico – Triásico (Aguirre et al., 1972). Sin embargo, otros autores estiman que tanto el peak metamórfico como la mayor parte del metamorfismo en sí, para la serie en cuestión, ocurriría entre el Carbonífero al Pérmico inferior más antiguo (Willner et al., 2005).

Serie Oriental del Basamento Metamórfico (Silúrico – Carbonífero): Las rocas metamórficas que se distribuyen en la región más occidental del área, como una franja prácticamente continua de dirección general NNE-SSW, corresponden, según Aguirre et al.

(1972), a la Serie Oriental, compuesta principalmente por esquistos, filitas, gneises y metareniscas, cuyo grado de metamorfismo varía entre las facies de esquistos verdes y granulita, y se caracteriza por la aparición sucesiva, de oeste a este, de biotita, andalucita y sillimanita, según el grado creciente de metamorfismo (DGA, 2012).

Figura 4. Mapa geológico de la Provincia de Concepción.



Fuente: Modificado de Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003; DGA, 2012).

Unidades Sedimentarias

Formación Santa Juana (Triásico superior): Se define como una secuencia de rocas sedimentarias continentales y marinas, con flora y fauna fósiles, reconocida en el curso inferior del Río Biobío (Ferraris, 1981). Esta unidad se dispone, en discordancia erosiva sobre el Basamento granítico y en contacto por falla sobre la Serie Oriental del Basamento Metamórfico (DGA, 2012). Su techo lo constituye la actual superficie de erosión. Esta secuencia sedimentaria está compuesta por areniscas pardas y grises, y lutitas negras con fósiles marinos y escasos restos vegetales, de un espesor total del orden de 400 m. Esta formación se habría depositado en ambientes continentales alternando con un período de depositación marina. Los afloramientos expuestos en el área representarían un ambiente marino y, más específicamente, infralitoral (Cucurella, 1978).

Formación Quiriquina (Cretácico superior): Se define como una secuencia sedimentaria de origen marino, que corresponde a la unidad denominada Capas o Estratos de Quiriquina (Hoffstetter et al., 1957). La Formación Quiriquina se dispone, en discordancia angular y de erosión, sobre las rocas ígneas y metamórficas paleozoicas de la costa, y está localmente cubierta, aparentemente en concordancia, por las capas arenosas del Terciario inferior. Wetzel (1930) realizó una revisión litológica y paleontológica de estas rocas, subdividiéndolas en tres unidades: (a) Conglomerado basal, cuya composición litológica y espesor varía según su ubicación. Corresponde, en general, a rodados de cuarzo, de rocas metamórficas y de granodioritas, con una matriz arenosa y glauconítica (Chotin, 1969). Tiene espesores variables, alcanzando potencias máximas de hasta 30 m; (b) Un banco cuarcífero principal, rico en moluscos fósiles de 0,2 m a 20 m de espesor y (c) Una zona de nódulos con Baculites; son 6,5 a 10 m de arcosas con nódulos que encierran abundante fauna fósil.

Formación Curanilahue (Eoceno inferior): La secuencia sedimentaria descrita por Chotin (1969) como una unidad marino-continental con mantos de carbón, equivalente a la parte inferior de la Formación Curanilahue, definida originalmente por Muñoz Cristi (1946), en la provincia de Arauco, con el nombre de Piso de Curanilahue. Los estratos de la Formación Curanilahue se apoyan, discordantemente, sobre las rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico y en aparente concordancia de estratificación, sobre las capas cretácicas de la Formación Quiriquina (Chotin, 1969). Sin embargo, esta última relación de contacto correspondería, en realidad, a una pseudoconcordancia, por cuanto Sylvester y Sangüesa (1948) señalan que existe una interrupción en el registro fosilífero de la parte superior del Cretácico, lo que evidencia un hiatus entre ambas formaciones. En base a lo anterior, estos autores concuerdan con lo planteado por Muñoz Cristi (1946) para la provincia de Arauco, donde las series cretácicas y terciarias expuestas estarían separadas por una discordancia angular y de erosión. La Formación Curanilahue se encuentra parcialmente cubierta, en discordancia de erosión y levemente angular, por mantos de arenas cuarcíferas del Cuaternario (Gajardo, 1972).

La litología descrita por Sylvester y Sangüesa (1948) consiste en areniscas, arcillas y mantos de carbón, con un espesor total aproximado de 160 m. El ambiente de depositación es marino y continental.

Formación Banco del Laja (Pleistoceno – Holoceno): Fue definida por Brüggén (1913, en Hoffstetter et al., 1957), para designar a “una roca conglomerado o brecha, sin estratificación y potencia variable entre 1 y 40 metros”. Se trata de un banco de tobas brechosas, con clastos angulosos que varía de 1 a 50 cm en una matriz cinerítica de composición andesítico-basáltica (DGA, 2012). Su lugar tipo corresponde al Salto del Laja, donde sobreyace en concordancia a la

Formación Mininco (Muñoz Cristi, 1960; Ferraris, 1981) e infrayace a los Depósitos de Arenas del Cono del Río Laja.

Depósitos de areniscas y arcillolitas marinas (Plioceno – Holoceno): Unidad conformada por areniscas y arcillolitas que se ubica en la Península de Arauco. Este depósito yace sobre la Fm. Tubul (DGA, 2012).

Terrazas marinas (Pleistoceno – Holoceno): Unidad que se encuentra cubierta por sedimentos arenosos y limosos parcialmente estratificados provenientes de erupciones volcánicas (DGA, 2012).

Sedimentos de terrazas fluviales (Holoceno): Unidad conformada por los depósitos de gravas y arenas con espesores de hasta 20m en niveles de terrazas que se ubican en los ríos principales del área. El depósito se caracteriza por componerse de gravas y ripios con clastos redondeados a subredondeados de andesitas y granitos con diámetros de entre 8 y 30 cm, junto a fracciones variables de arenas y limos. Se estima que estos rellenos aterrizados poseen una permeabilidad promedio de 10^{-3} cm/s (DGA, 2012).

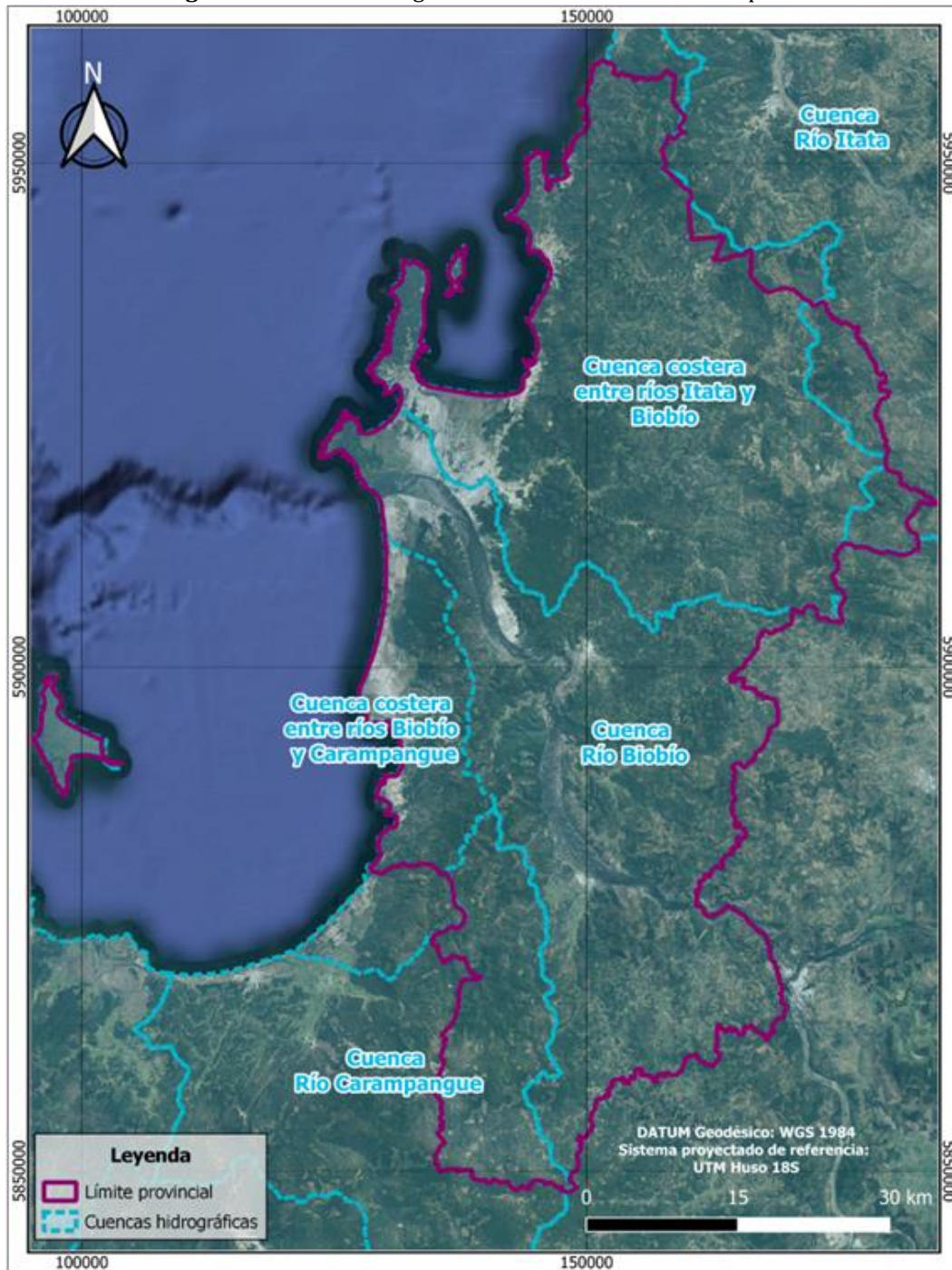
Depósitos fluvio-aluviales antiguos (Pleistoceno – Holoceno): Unidad de material no consolidado compuesta de gravas, ripios y arenas que constituyen el relleno de los paleocauces de ríos y esteros. Se estima que estos rellenos poseen permeabilidades entre 5×10^{-3} y 10^{-3} cm/s (DGA, 2012).

Depósitos fluvio-aluviales actuales (Pleistoceno – Holoceno): Unidad de material no consolidado compuesto por depósitos fluviales de bloques, gravas, arenas y arcillas ubicados en los cauces actuales de los ríos y esteros. También incluye los depósitos de abanicos fluviales que conforman importantes espesores de arenas y gravas en las desembocaduras de los cauces. Se estima que estos rellenos actuales poseen permeabilidades de entre 10^{-2} y 10^{-3} cm/s (DGA, 2012).

- **Hidrogeología**

La Provincia de Concepción abarca la cuenca costera entre el Río Itata y Río Biobío, la mayor parte de la cuenca costera entre el Río Biobío y Río Carampangue, y partes de las cuencas del Río Biobío, Río Carampangue y Río Itata (**Figura 5**). En esta zona, con un clima templado húmedo y cuencas con régimen pluvial, las precipitaciones constituyen el principal factor de recarga de los acuíferos, por lo que el nivel freático variará según la estación del año, y más superficial en las lluviosas.

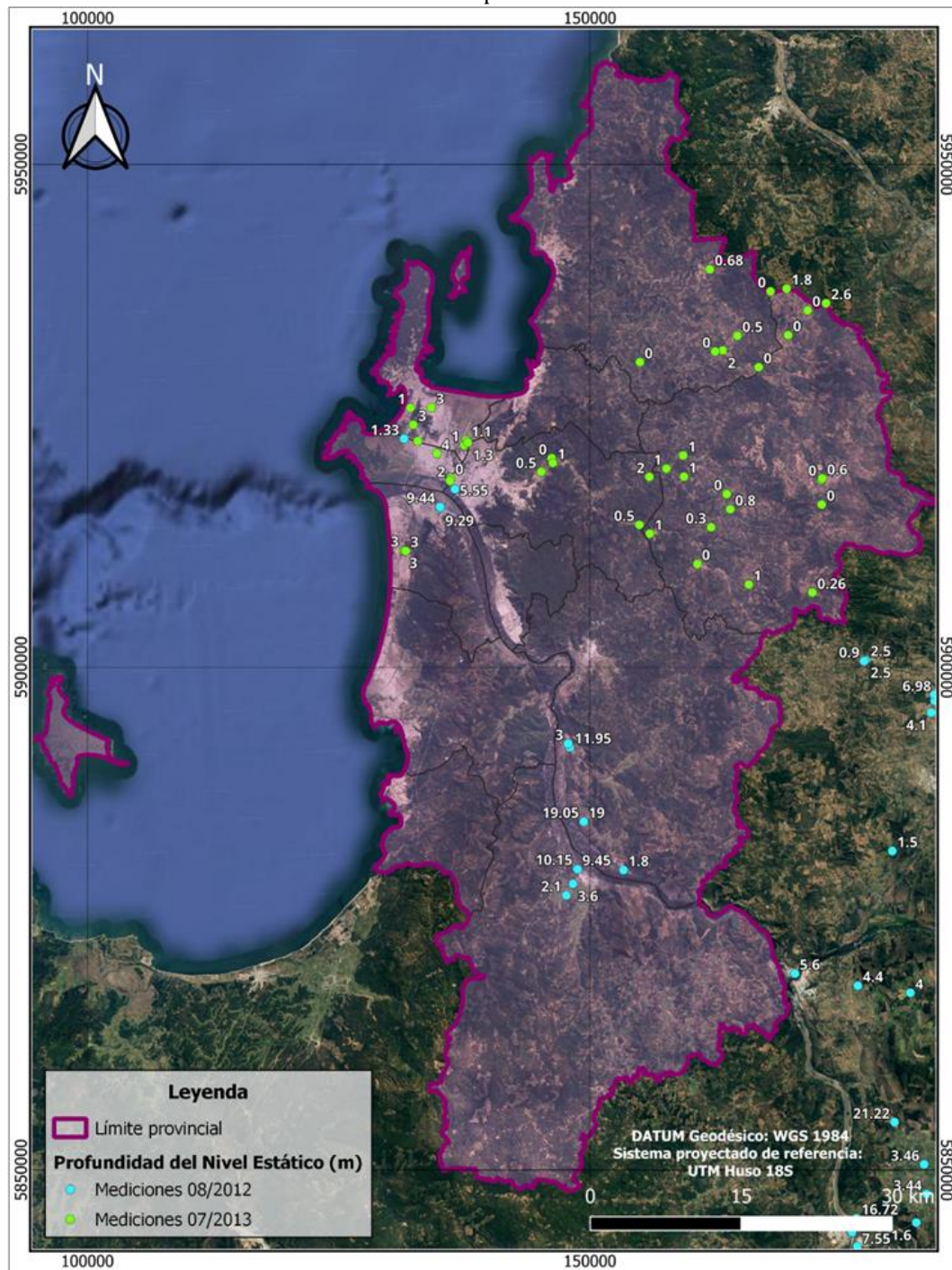
Figura 5. Cuencas hidrográficas de la Provincia de Concepción.



Fuente: Dirección General de Aguas (DGA).

Nivel Estático: En el 2012, para la realización de un estudio hidrogeológico, se realizó una campaña de medición de niveles estáticos en 180 pozos distribuidos en la cuenca del río Biobío (DGA, 2012). Esto se realizó específicamente entre los meses de agosto y septiembre. De la misma forma, en 2013 durante el mes de julio se realizan mediciones en las cuencas costeras en la región del Biobío (DGA, 2013). En la **Figura 6** se puede observar la ubicación de los pozos utilizados y su respectiva profundidad de nivel estático.

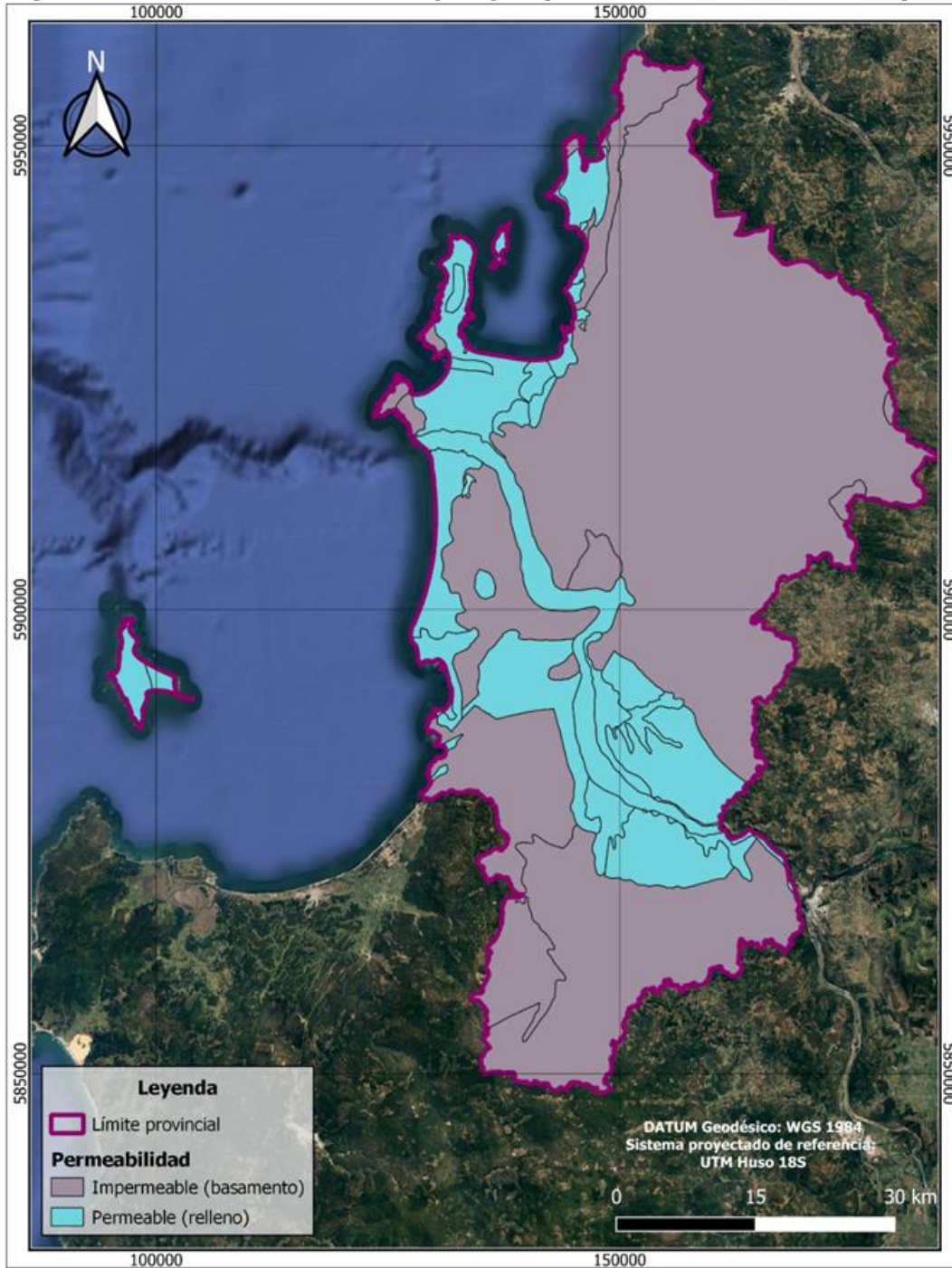
Figura 6. Profundidad del Nivel Estático en meses invernales en distintos puntos de la provincia de Concepción.



Fuente: DGA (2012, 2013).

Permeabilidad: En base a la geología del lugar, se puede definir que las unidades correspondientes a basamento (rocas ígneas y metamórficas) son de carácter impermeable y las correspondientes a rellenos sedimentarios son permeables **Figura 7**.

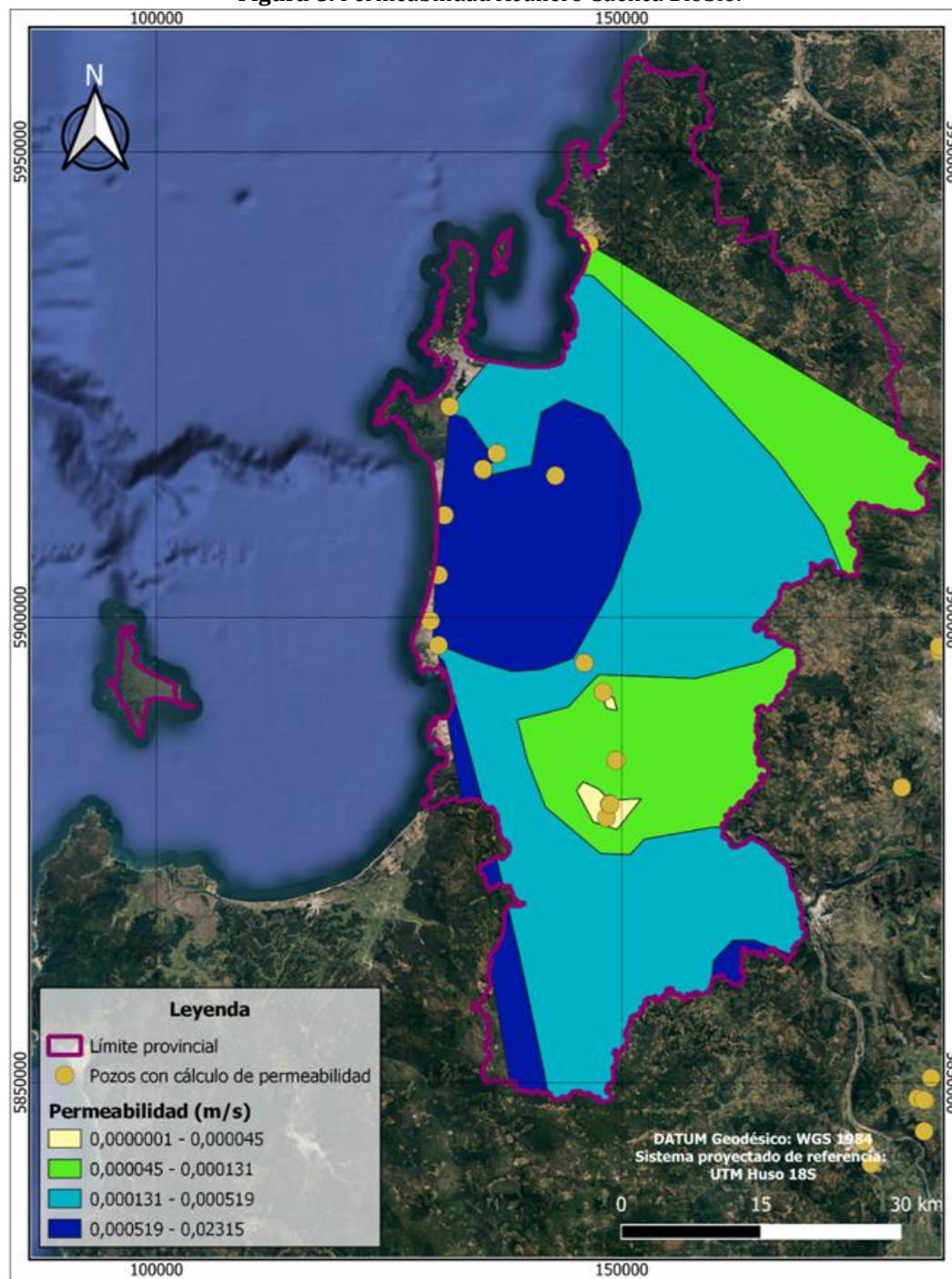
Figura 7. Permeabilidad de las unidades geológicas presentes en la Provincia de Concepción.



Fuente: DGA, 2012

Adicionalmente, en 2012 se realizó una campaña de medición de permeabilidad en pozos localizados en la cuenca del Río Biobío (DGA, 2012). En la **Figura 8** se muestran los resultados de dicho estudio y la distribución de los pozos utilizados.

Figura 8. Permeabilidad Acuífero Cuenca Biobío.



Fuente: DGA (2012).

4. ESTRUCTURA METODOLÓGICA GENERAL

La “CONSULTORÍA SOBRE INFRAESTRUCTURA ECOLÓGICA Y RIESGO DE DESASTRES EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO, PARA LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN”, se estructuró en dos componentes principales i) amenazas y riesgo de desastre e ii) infraestructura ecológica, y dos componentes transversales iii) Cartografía y iv) Participación y Reuniones. La **Figura 9** muestra el diagrama metodológico que explica la integración de los componentes y etapas del estudio, y se incluyen en color celeste los elementos transversales como el estudio del cambio climático y las recomendaciones para la Planificación Territorial.

En la Etapa 1 y 2 se analizó las amenazas y riesgo de desastre e infraestructura ecológica, sumado a ello, se estudió el cambio climático para la provincia de Concepción. Durante la Etapa 2 se trabajó en las recomendaciones orientadas a la Planificación Territorial, asociadas a las áreas de amenazas y riesgos (2.1.17 OGUC) y áreas de valor natural o protección ambiental (2.1.18 OGUC). Finalmente, en las Etapas 3 y 4, los componentes de riesgos e infraestructura ecológica se integran en la colaboración y evaluación de las opciones de desarrollo y posteriormente en el acompañamiento de la consulta de la imagen objetivo.

Figura 9. Propuesta de integración metodológica de los principales componentes y etapas del estudio de infraestructura ecológica y riesgo de desastres en un escenario de cambio climático, para la Provincia de Concepción.



Fuente: Elaboración propia a partir de B.T.

5. CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN

El abordaje de las implicancias del Cambio Climático es un eje transversal al estudio de riesgos y de infraestructura ecológica. Para su comprensión, se estudió en primer lugar el comportamiento de los datos históricos con las estaciones meteorológicas existentes, y, en segundo lugar, se incluyeron datos de reanálisis disponibles y Modelos de Circulación Global (MCG).

5.1. DATOS HISTÓRICOS

Análisis de disponibilidad de datos

Para analizar las tendencias históricas de los datos hidrometeorológicos se realizó una evaluación de la cantidad y calidad de datos. Las estaciones consideradas para este análisis se presentan en las **Tabla 3** y **Tabla 4**. A estas estaciones, se les realizó un análisis de disponibilidad de datos, análisis de frecuencia y finalmente un análisis de tendencia. Para así conocer el comportamiento del clima y/o caudales en cada punto.

Tabla 3. Estaciones meteorológicas.

Región	Cod_bna	Nombre	Institución
8	08220005-3	Las Pataguas	DGA
8	08220006-1	Andalién	DGA
8	08220008-8	Estero Nonguén frente a U. del Bío Bío	DGA
8	08394001-8	Río Bío Bío en Desembocadura	DGA
8	08393002-0	Estero Hualqui en Desembocadura	DGA
8	08410001-3	Concepción DGA	DGA
8	08140001-6	Rafael	DGA
8	08210002-4	Dichato	DGA
8	08210003-2	Estero Bellavista en Tomé	DGA
8	-	Carriel Sur	DGAC
8	-	Chiguayante	INIA
8	-	Punta de Parra	INIA

Fuente: Elaboración propia con datos de DGA.

Tabla 4. Estaciones fluviométricas.

Región	Cod_bna	Nombre
8	08220001-0	Río Andalién camino a penco
8	08220008-8	Estero Nonguén frente U. del Bío Bío
8	08220010-K	Río Andalién antes ex peaje Chaimavida
8	08394001-8	Río Bío Bío en Desembocadura
8	08393002-0	Estero hualqui en Desembocadura
8	08210003-2	Estero bellavista en Tomé

Fuente: Elaboración propia con datos de DGA.

El análisis de disponibilidad de datos mostró que se tienen 6 estaciones meteorológicas con un registro correcto de más de 90% en sus respectivos periodos de actividad, 5 oscilan entre 90%

y 80%, y solo una tiene un porcentaje de datos en el periodo de actividad de menos de 80% (77%).

En cuanto al análisis de disponibilidad de datos por estación, se consideró el porcentaje (%) solo entre las fechas en que se cuenta registro, a diferencia de la disponibilidad de datos en el periodo, donde se consideró años completos. En este análisis, se muestra que, en promedio entre todas las estaciones, se tiene que el porcentaje de presencia de datos de forma ascendente: primavera, invierno, verano y otoño.

En el caso de la estación de invierno, que es finalmente donde más se tiene precipitación, se tuvo buenos registros de datos, mayores a 85% en 11 de 12 estaciones, solo una estación presentó un número menor, que es de 75% en la estación de estero Hualqui en Desembocadura.

En cuanto a las estaciones fluviométricas, 2 de 6 estaciones presentaron niveles de % de datos mayores a 90%, 3 que oscilaron entre el 80% y 90%, y una con un porcentaje de datos deficiente de 62.5%, que corresponde a la estación Estero Hualqui en Desembocadura.

En cuanto al análisis estacional, se utilizó el mismo criterio que para las estaciones meteorológicas, en todas las estaciones se reportó porcentajes de registro de datos superiores al 88%, excluyendo la estación Estero Hualqui en Desembocadura, debido a su deficiencia en el registro total.

Tabla 5. Análisis de disponibilidad de datos, Estaciones Meteorológicas

Estación	Año inicio	Año final	Longitud del registro (años)	% de datos en el periodo	% de datos en el periodo Invierno	% de datos en el periodo Otoño	% de datos en el periodo Primavera	% de datos en el periodo Verano
Las Pataguas	1993	2019	27	91,4%	89,4%	95,5%	89,4%	91,3%
Andalién	2001	2019	19	97,1%	96,3%	100,0%	92,2%	99,7%
Estero Nonguén frente a U. del Bío Bío	2009	2023	15	89,5%	92,7%	88,1%	88,2%	89,2%
Río Bío Bío en Desembocadura	2001	2023	23	87,6%	88,1%	87,1%	85,9%	89,2%
Estero Hualqui en Desembocadura Concepción DGA	2009	2023	15	77,3%	75,3%	81,5%	71,8%	80,8%
Rafael	1996	2023	28	94,9%	96,1%	94,9%	94,7%	93,9%
Dichato	1993	2019	27	96,2%	94,9%	99,5%	91,7%	98,0%
Estero Bellavista en Tomé	1980	2019	40	97,0%	99,3%	96,4%	94,0%	97,4%
Carriel Sur	2009	2023	15	88,1%	93,1%	88,6%	84,0%	86,5%
Chiguayante	1950	2023	74	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Punta de Parra	2013	2023	11	89,5%	97,1%	100,0%	100,0%	100,0%
	2009	2020	12	84,1%	92,9%	97,1%	93,4%	97,1%

Fuente: Elaboración propia con datos de DGA.

Tabla 6. Análisis de disponibilidad de datos, Estaciones Fluviométricas.

Estación	Año inicio	Año final	Longitud de registro (años)	% de datos en el periodo	% de datos en el periodo Invierno	% de datos en el periodo Otoño	% de datos en el periodo Primavera	% de datos en el periodo Verano
Río Andalién camino a Penco	1960	2019	60	85,7%	96%	93%	98%	95%
Estero Nonguén frente U. del bio bio	2009	2022	14	88,3%	89%	91%	86%	87%
Río Andalién antes ex peaje Chaimavida	2015	2019	5	91,9%	83%	84%	100%	100%
Río Bío Bío en desembocadura	1970	2023	54	83,4%	86%	81%	82%	84%
Estero Bellavista en Tomé	2009	2020	12	92,7%	95%	88%	94%	94%
Estero Hualqui en Desembocadura	2009	2020	12	62,5%	67%	67%	53%	63%

Fuente: Elaboración propia con datos de DGA.

Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia se llevó a cabo, para todas las estaciones, considerando cuatro variables: precipitación máxima anual en 24 horas, caudal, temperatura media, mínima y máxima. Se realizó utilizando software EasyFit, el cual tiene como input los valores máximos anuales de cada parámetro, seleccionándose para el cálculo de los distintos periodos de retorno la función de distribución de probabilidades con mejor ajuste al set de datos, tanto gráficamente, como mediante la evaluación de indicadores estadísticos (Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling). Para efectos de este estudio, los periodos de retorno de interés fueron: 2, 5, 10, 50, 100, 150 y 200 años.

Las funciones de mejor ajuste a los datos fueron: LogNormal para temperaturas, Gamma para precipitaciones y Pearson o Normal para caudales.

En las **Tabla 7** a **Tabla 11** se presentan los resultados para los distintos periodos de retorno para caudales, precipitación y temperaturas según disponibilidad de datos.

Tabla 7. Periodos de retorno para estaciones fluviométricas (caudal).

Estación	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 150 años	T = 200 años
Río Andalién	115,7	174,3	204,9	237,6	258,7	277,8	288,0	295,1
Estero Nonguén Frente a U. del Bío Bío	10,8	22,7	33,5	50,8	66,3	84,3	96,1	105,1
Bío Bío en Desembocadura	5067	8278	10503	15730	18111	19555	20605	17378
Estero Hualqui en desembocadura	3,3	6,4	8,9	11,5	15,4	18,6	20,6	22,1
Estero Bellavista Tomé	25,9	39,6	49,3	59,1	72,6	83,2	89,6	94,2

*Valores en m^3/s .

En el caso de la estación Río Andalién ex peaje no se realizó el cálculo de los periodos de retorno, debido a que se tiene un registro con una extensión inferior a 10 años (5 años), que es el umbral que se utilizó. Se consideraron 10 años, a pesar de no ser lo ideal fijado en 20 o 30 años, para contar con un registro más extendido del número de estaciones.

Tabla 8. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Precipitación)

Estación	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 150 años	T = 200 años
Las Pataguas	61,2	94,7	136,2	313,1	438,0	529	603,0
Andalién	78,6	109,7	132,4	187,6	213,2	228,8	240,1
Estero Nonguén frente U. del Bío Bío	62,0	87,0	111,2	194,1	245,9	282,1	311,1
Río Bio Bío en desembocadura	73,2	83,1	95,3	104,1	112,7	117,4	120,9
Estero Hualqui en desembocadura	70,0	76,4	83,3	87,8	91,9	94,1	95,6

Estación	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 150 años	T = 200 años
Concepción DGA	89,1	112,4	146,2	174,4	205,3	224,6	238,9
Rafael	112,5	132,8	158,5	177,7	196,9	208,3	216,3
Dichato	75,6	93,5	122,5	149,5	181,9	203,8	220,8
Estero	72,4	84,4	100,7	113,6	127,1	135,3	141,3
Bellavista Tomé							
Carriel Sur	92,8	110,6	134,5	153,4	173,2	185,3	194,1
Chiguayante	81,1	89,4	99,4	106,6	113,6	117,6	120,5
Punta de Parra	69,2	87,2	111,3	130,3	149,9	161,8	170,4

*Valores en *mm* .

Tabla 9. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Temperatura media).

Estación	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 150 años	T = 200 años
Carriel Sur	12,4	12,7	12,9	13,1	13,2	13,3	13,4	13,4
INIA	12,9	13,8	14,4	15,1	15,7	16,2	16,6	16,8
Punta de Parra								
INIA	13,6	14,0	14,4	15,0	15,4	16,0	16,3	16,6
Chiguay ante								

*Valores en *°Celsius* .

Tabla 10. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Temperatura máxima).

Estación	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 150 años	T = 200 años
Carriel Sur	29,5	31,9	33,5	35,4	36,9	38,3	39,2	39,8

*Valores en *°Celsius* .

Tabla 11. Periodos de retorno para estaciones meteorológicas (Temperatura mínima).

Estación	T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años	T = 150 años	T = 200 años
Carriel Sur	-1,3	-2,1	-2,5	-3,0	-3,3	-3,6	-3,8	-3,9

*Valores en *°Celsius* .

Análisis de tendencia

El análisis de tendencia identificó patrones de cambio a lo largo del tiempo, los que pueden ser aumento, disminución o ausencia de tendencia en los datos. Para esto, existen diversos test, que evalúan el registro histórico y busca patrones de comportamiento. Los test utilizados se explican a continuación.

Test de Mann Kendall

Mann-Kendall, es un test no paramétrico que se utiliza para identificar la tendencia monotónica de un conjunto de datos. Esta prueba, es las más recomendadas para identificar tendencias climatológicas e hidrológicas. De este test, se obtienen dos valores, el estadístico Z y su correspondiente nivel de significancia, que se representa por el parámetro p-value.

El estadístico Z indica si hay o no tendencia en los datos y cuál es su magnitud, indicando, según el signo del parámetro si la tendencia es negativa (Z negativo) o si la tendencia es positiva (Z positivo), por otro lado, el valor de p-value indica si se rechaza o no la hipótesis nula, es que no hay tendencia en los datos. Lo usual es que, si el valor de p-value es mayor a 0.05, no existe una tendencia en los datos, y en caso contrario, si hay tendencia en los datos.

Test de la pendiente de Senn

Esta prueba, calcula la pendiente, o tasa de cambio para los datos, entregando una pendiente que representa a la totalidad del registro, el signo de la pendiente indicó la tendencia que se tiene, y el valor del parámetro entregado indicó la magnitud de este cambio.

Test de Pettitt.

Pettitt, se utiliza para encontrar un punto, o varios puntos según se quiera, en donde los datos históricos tienen un cambio “estructural”, es decir, desde ese punto en adelante, cambio el comportamiento de los datos. Este test, entrega tres elementos, primero un valor de U^* que se llama valor crítico, el cual es un valor que, al ser comparado con los valores que se tienen en el registro, debe ser el mayor, en caso de que no lo sea, se rechaza la hipótesis nula, y, por lo tanto, se tiene un cambio estructural en los datos. Los otros valores de salida corresponden al nivel de significancia, que sigue las mismas reglas que en el test de Mann-Kendall, y el valor de posición K, que indica en qué punto del registro, se comienza a evidenciar el cambio en el comportamiento.

Resultados de Análisis de tendencia

Los resultados del análisis de tendencia, para los parámetros de caudal máximo anual, precipitación anual, temperatura máxima anual, temperatura promedio máxima anual y temperatura mínima anual se presentan en las **Tabla 12** a **Tabla 13**. Dichos test comparten la característica de que, en caso de que no se logre un nivel de significancia del 95 %, es decir un valor de p-stat menor a 0.05, la hipótesis es rechazada, por lo que los resultados de cada test no son concluyentes.

En el caso de los caudales máximos anuales, los resultados indica por lo general una disminución a lo largo de los años. En el caso de aumentos, se puede ver que el parámetro p-stat es mayor a 0.05 por lo que se rechaza dicha hipótesis. Además, gracias al test de Pettitt, se puede ver que, en las estaciones con registros más largos, se ven cambios estructurales en su periodo de medición. En la **Tabla 12**, se destacan en color gris claro las estaciones que cumplen los requisitos de la prueba y que exhiben una disminución en los registros.

Para el caso de las precipitaciones anuales, se reportaron reducciones para casi todas las estaciones que cumplen con un valor de p-stat aceptable, lo que señala que a medida que va pasando el tiempo, se tienen menores precipitaciones, lo cual se condice con los resultados de los test de tendencia para caudales, evidenciando una estrecha relación. En la **Tabla 13**, se destacan en color gris claro las estaciones que cumplen los requisitos de la prueba y que exhiben una disminución en los registros.

Los test para temperaturas indican resultados un poco más ambiguos, debido a que, en la estación Carriel Sur, que es la única que mide temperatura media, máxima y mínima, y además cumple con los niveles de significancia de 95%, se tiene un aumento sostenido y significativo en la temperatura media, con cambios estructurales definidos. Disminuciones en las temperaturas máximas con cambios estructurales claros y aumentos en las temperaturas mínimas, también con cambios estructurales claros. En **Tabla 14**, **Tabla 15** y **Tabla 16**, se destacan en color gris claro las estaciones que cumplen los requisitos de la prueba y que exhiben cambios en tendencia demostrados.

Tabla 12. Resultados de pruebas de tendencia para caudales.

Estación	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	p-value	K
Río Andalién	-2.158	0.031	-1.258	0.031	352	0.057	35
Estero Nonguén Frente a U. del Bío Bío	0.480	0.631	0.850	0.631	21	0.487	5
Bío Bío en Desembocadura	-2.612	0.009	-73.646	0.009	366	0.002	33
Estero Hualqui en desembocadura	-1.640	0.101	-0.600	0.101	18	0.524	6
Estero Bellavista Tomé	1.440	0.150	1.393	0.150	26	0.229	4

Tabla 13. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (precipitación anual).

Estación	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	K	p-value
Las Pataguas	0.208	0.83486	2.247	0.83486	30.000	5.000	1.00000
Andalién	-1.889	0.05886	-24.500	0.05886	60.000	6.000	0.10041
Estero Nonguén frente U. del Bío Bío	-2.474	0.01335	-28.100	0.01335	52.000	7.000	0.02207
Río Bío Bío en desembocadura	-1.463	0.14334	-13.275	0.14334	84.000	18.000	0.10573
Estero Hualqui en desembocadura	-1.246	0.21291	-25.033	0.21291	24.000	4.000	0.18507
Concepción DGA	-3.042	0.00235	-30.500	0.00235	108.000	14.000	0.04323
Rafael	0.023	0.98137	2.632	0.98137	46.000	13.000	0.91563
Dichato	-2.384	0.01714	-7.293	0.01714	150.000	24.000	0.11977
Estero Bellavista Tomé	-0.467	0.64043	-12.300	0.64043	12.000	8.000	1.00000
Carriel Sur	-4.452	0.00001	-6.775	0.00001	747.000	57.000	0.00058
Chiguayante	0.000	1.00000	-0.350	1.00000	9.000	5.000	1.00000

Estación	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	K	p-value
Punta de Parra	1.564	0.11785	78.067	0.11785	20.000	4.000	0.10333

Tabla 14. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (temperatura media).

Estación	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	K	p-value
Carriel Sur	5.0378	0.0000005	0.0184	0.0000005	484	14	0.0016808
INIA Punta de Parra	0.8908	0.3730531	0.0438	0.3730531	36	3	0.2306502
INIA Chiguayante	-0.9342	0.3502014	-0.0799	0.3502014	18	4	0.5242976

Tabla 15. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (temperatura máxima)

Estación	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	K	p-value
Carriel Sur	-2.2040	0.0275	-0.0326	0.0275	768	16	0.0004

Tabla 16. Resultados de pruebas de tendencia para estaciones meteorológicas (temperatura mínima)

Estación	Mann-Kendall trend test		Sen's Slope		Pettitt Test		
	Z	p-stat	Sen's Slope	p-value	U*	K	p-value
Carriel Sur	3.2496	0.0012	0.0161	0.0012	582	27	0.0142

5.2. DATOS PROYECTADOS

Chile es un país vulnerable al cambio climático, ya que cumple con 7 de las 9 características de vulnerabilidad definidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Font, 2019). La Región del Biobío no está ajena a lo anterior, las temperaturas y precipitaciones anuales en la cuenca del Río Biobío entre los años 1988- 2017 donde la estación Carriel Sur (20 m.s.n.m.) presenta de 1411 mm y 12,5°C y 1003 mm, respectivamente, presentando un aumento de 0,15°C, y una disminución de 244 mm, en las temperaturas y precipitaciones respectivamente, entre las décadas 1988-1997 y 2008-2017 (Araneda et al., 2020).

Por otra parte, en la cuenca del Biobío se realizó un análisis de los efectos del cambio climático en el comportamiento temporal y espacial de la sequía para datos (Bobadilla et al., 2023), utilizando cuatro los Modelos de Circulación Global (MCG) utilizados en la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA 2017). De acuerdo con Bobadilla et al., (2023) las proyecciones climáticas ocupadas pueden consultarse gratuitamente previa solicitud en gratuitamente previa solicitud a <https://siac.mop.gob.cl/>. Los resultados muestran que dependiendo del MCG

utilizado las precipitaciones disminuirían entre 23% y 10% comparando el periodo futuro (2034–2060) con el periodo de referencia (1993–2019). En el caso de las temperaturas máximas se espera un aumento entre 6% y 9% y en las temperaturas mínimas entre 15% y 21%. Los caudales en la desembocadura se esperan disminuyan entre 21% y 10%, dependiendo del modelo utilizado. En cuanto a la evaluación de sequías mediante el índice de sequía meteorológica (SPI) en el sector de la provincia de Concepción no se proyecta un cambio en magnitud, en el caso de la duración se proyecta un aumento de entre 10% y 20%, por otra parte, se espera un aumento del número de eventos. En el caso de la sequía hidrológica, se utilizó el Índice de caudal estandarizado (SSFI) proyectándose un aumento en la magnitud de hasta un 20% en algunas comunas, un aumento en la duración entre 30% y 40%, y un aumento en el número de eventos.

Otro factor importante para considerar son las islas de calor en sectores urbanos, Martínez (2021) estudió las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén y su relación con las Zonas Climáticas Locales (ZCL) para el periodo 2002 -2019. En dicho estudio se identificó que el horario diurno en verano es el más afectado por las islas de calor urbana superficial, localizándose las con mayor intensidad en la comuna de Talcahuano, principalmente en tres zonas: i) zona costera (Huachipato, Puerto de Talcahuano, Zona Industrial); ii) aeropuerto Carriel Sur; y iii) zona del Mall Plaza Trébol. En el caso de Hualpén las dos zonas con altas intensidades son: i) zona costera de la comuna sector de la Refinería de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP); y ii) sector del Club Hípico de Concepción. En la comuna de Concepción se observan altas intensidades en toda la comuna. Los resultados anteriores concuerdan con lo planteado por Romero (2019).

En la **Figura 10** a **Figura 11** se presenta la temperatura promedio anual para el periodo 1993–2022, las proyectadas para el periodo 2031–2060 y la variación de temperaturas máximas y precipitaciones en la provincia de Concepción, considerando los distintos modelos climáticos utilizados por Bobadilla et al., (2023). Los datos se extrajeron en los puntos mostrados en la **Figura 10**, eliminándose algunos *outliers*. Se aprecia que existen diferencias en las proyecciones entre los distintos modelos, tanto para precipitación como temperatura. En el caso de las precipitaciones se esperan disminuciones que podrían alcanzar hasta el 30% para el caso del modelo IPLS. En el caso de las temperaturas máximas el modelo MIROC es el que proyecta mayores aumentos llegando a 1,45°C, mientras los otros dos muestran cambios más moderados, pero todos sobre 0,9°C.

Para el análisis de amenazas climáticas se utilizan los datos disponibles en ARCLIM (<https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>), a través de índices relacionadas con temperaturas, viento y precipitación. En la **Tabla 17** se presentan los valores promedio histórico entre los años 1980 y 2010 y su variación proyectada para un periodo futuro cercano (2035-2065 bajo el escenario RCP8.5) para las distintas comunas.

En la **Tabla 17** se puede ver que los días secos consecutivos, varían entre 51,82 (Tomé) y 42,77 (Lota) con un promedio de 47,63 para las distintas comunas de la Provincia de Concepción. La comuna que presenta la mayor amplitud térmica es Santa Juana (13,07°C) y la menos se da en Talcahuano (9,56°C), con un promedio en el área de estudio de 11,32°C. Por otra parte, frecuencia de sequía es la misma en todas las comunas. En el caso de los días sobre 30°C, la comuna de Santa Juana y Hualqui son las únicas que tienen más de 10 días al año sobre esta temperatura, la sigue Florida con 6 días y las demás con 3 o menos días. El viento máximo diario es mayor en la comuna de Hualpén (8,23 m/s) y menor en Hualqui (6,46 m/s), con un promedio de 7,38 m/s.

Figura 10. Precipitaciones anuales promedio (mm) para el periodo actual 1993–2022, para el periodo 2031–2060 y porcentaje de variación para distintos MCG (de izquierda a derecha: CCSMA4, IPLS, MIROC).

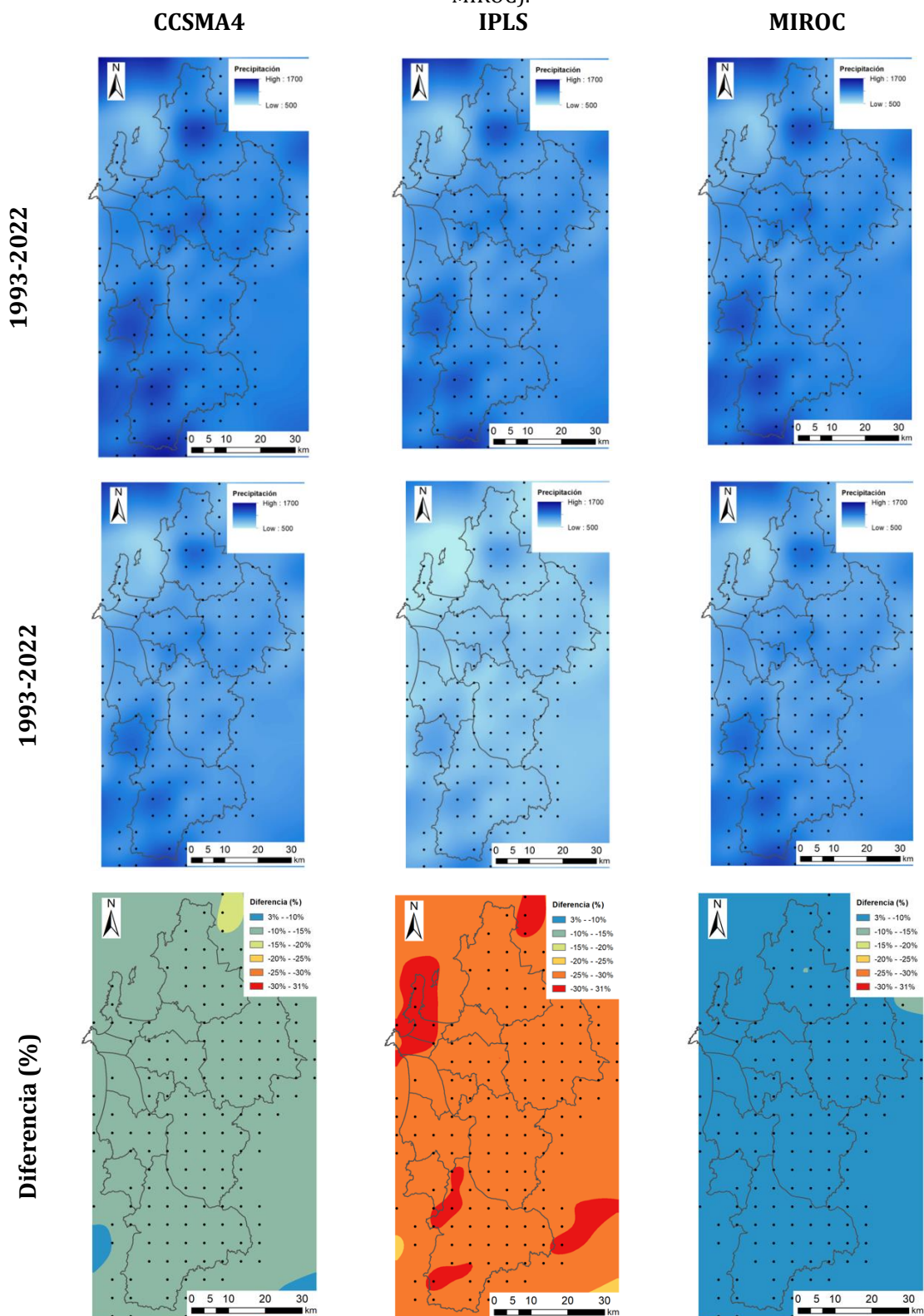


Figura 11. Temperatura máxima promedio para el periodo actual 1993–2022, para el periodo 2031–2060 y su variación para distintos MCG (de arriba hacia abajo: CCSMA4, CSIRO, IPLS, MIROC.

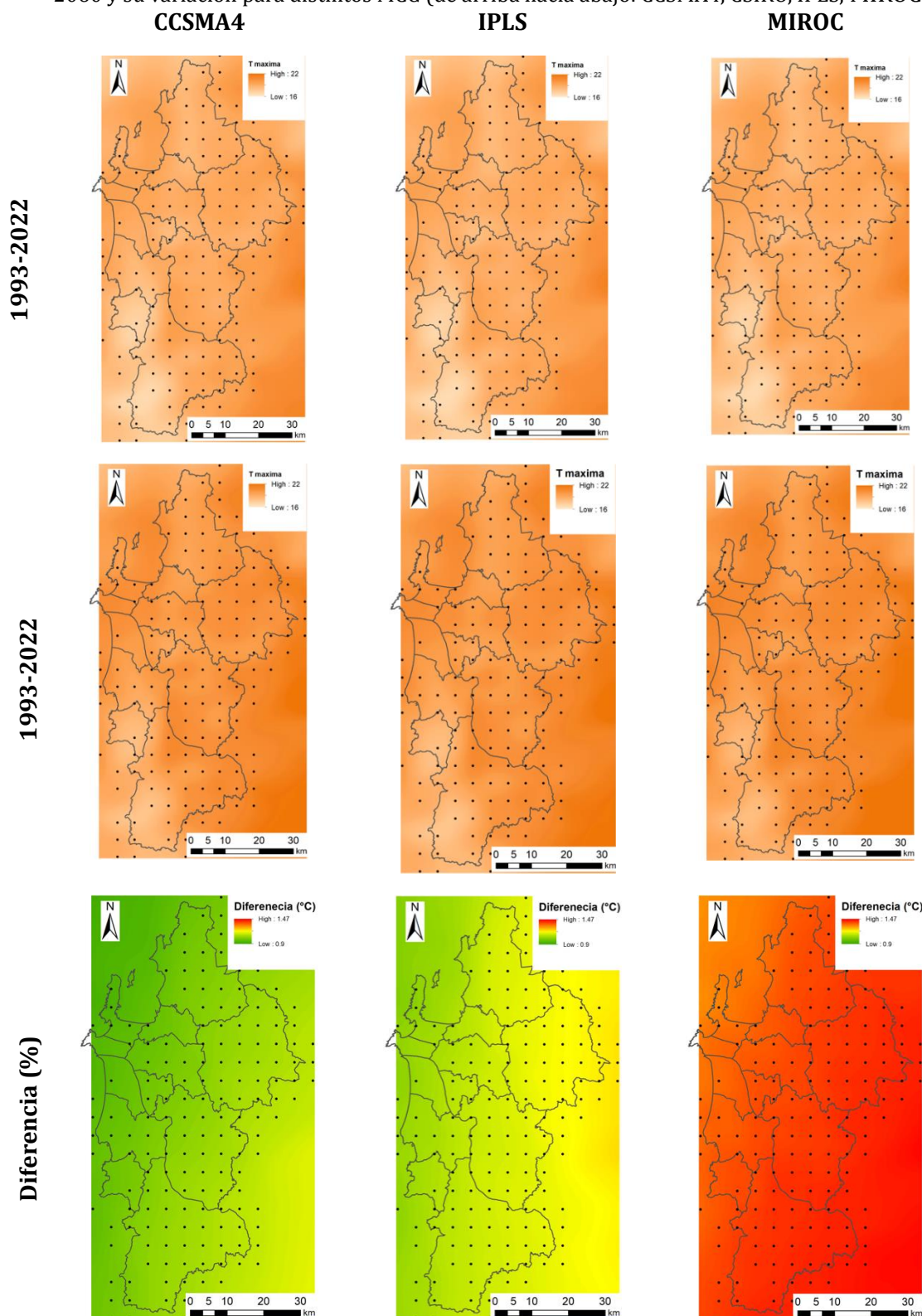


Tabla 17. Índices relacionados con amenazas producto de temperaturas, viento y precipitación.

Índice Analizado	Unidad	Chiguayante	Hualqui	Concepción	Hualpén	Coronel	San Pedro De La Paz	Santa Juana	Lota	Penco	Talcahuano	Tomé	Florida
Días secos consecutivos	días	47,06	45,78	48,33	50,22	46,08	46,88	43,51	42,77	49,10	50,69	51,82	49,27
Diferencia Relativa proyectada (%)		18,79	18,60	18,93	18,12	18,55	17,92	18,67	19,56	19,44	18,27	19,30	19,52
Amplitud térmica	grados	11,81	12,93	11,96	9,81	10,15	10,36	13,07	11,25	11,43	9,56	10,86	12,64
Diferencia Absoluta proyectada		0,39	0,36	0,35	0,19	0,24	0,33	0,40	0,34	0,32	0,21	0,30	0,32
Frecuencia de sequía	%	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33
Diferencia Absoluta proyectada		20,00	19,84	20,00	20,00	18,33	20,00	17,74	18,67	20,00	20,00	18,64	19,31
Evapotranspiración Potencial	mm	2,49	2,37	2,39	2,22	2,01	2,13	2,31	2,08	2,26	2,01	2,21	2,70
Diferencia Absoluta proyectada		0,29	0,27	0,27	0,18	0,18	0,22	0,28	0,22	0,24	0,17	0,24	0,32
Días calurosos (>30°C)	días	3,08	12,33	2,82	0,07	1,73	0,34	14,63	1,47	1,23	0,12	0,88	6,22
Diferencia Absoluta proyectada		8,39	16,77	8,10	0,56	4,04	1,96	17,02	4,74	5,05	0,88	3,53	12,71
Días de verano (> 25°C)	días	51,32	82,91	50,74	10,19	29,96	20,16	81,60	36,21	34,33	10,13	25,82	71,93
Diferencia Absoluta proyectada		30,15	29,21	30,26	14,83	20,24	21,99	28,32	26,18	27,96	13,53	23,48	30,54
Días cálidos	días	36,97	37,02	36,92	36,97	37,03	37,01	37,02	36,98	36,95	36,99	36,94	36,97
Diferencia Absoluta proyectada		48,31	46,98	49,05	51,08	49,06	49,04	47,15	48,44	49,86	51,34	50,40	47,18
Viento máximo diario	m/s	7,90	6,46	6,79	8,23	8,03	7,14	6,73	7,23	7,51	7,93	7,41	7,26
Diferencia Relativa proyectada (%)		1,16	0,22	1,41	-0,01	-0,25	1,00	-0,46	1,06	0,03	0,32	1,98	2,08
Viento medio	m/s	3,03	2,26	2,72	3,45	2,97	2,92	2,22	2,54	2,80	3,14	2,98	3,03
Diferencia Relativa proyectada (%)		0,04	-0,82	-0,06	0,02	-0,52	-0,07	-1,12	-0,80	-0,49	-0,15	-0,01	0,36
Precipitación máxima diaria	días	65,30	68,92	61,32	58,77	69,36	65,23	96,35	84,23	60,62	58,06	60,69	63,04
Diferencia Relativa proyectada (%)		-0,59	-0,63	-0,75	-0,48	-0,87	-0,40	-1,79	-1,47	-0,82	-0,51	-0,36	-0,12
Días de precipitación intensa	días	41,56	42,08	38,57	36,32	44,25	42,63	50,90	52,55	37,81	35,61	38,45	39,55
Diferencia Absoluta proyectada		-6,70	-6,67	-6,18	-5,85	-7,15	-6,76	-7,86	-8,09	-6,00	-5,78	-6,07	-6,17
Precipitación muy intensa	días	19,02	20,13	16,18	14,77	21,01	19,68	29,88	29,11	15,61	14,27	16,53	17,39
Diferencia Absoluta proyectada		-3,12	-3,28	-2,81	-2,72	-3,46	-3,27	-4,76	-4,89	-2,79	-2,58	-2,91	-2,97
Precipitación máxima diaria	mm	65,30	68,92	61,32	58,77	69,36	65,23	96,35	84,23	60,62	58,06	60,69	63,04
Diferencia Relativa proyectada (%)		-0,59	-0,63	-0,75	-0,48	-0,87	-0,40	-1,79	-1,47	-0,82	-0,51	-0,36	-0,12
Precipitación acumulada	mm	1180,7	1232,0	1081,2	1011,7	1277,5	1212,4	1720,8	1629,0	1050,5	985,7	1064,7	1115,8
Diferencia Relativa proyectada (%)		-15,13	-15,03	-15,25	-15,11	-15,08	-14,93	-14,63	-15,05	-15,21	-15,10	-15,01	-15,33

Fuente: Arclim (<https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>).

6. REFERENCIAS

- Aguirre, L., Hervé, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystalinikum*, 9(7), 19.
- Andrade, B., Arenas, F., & Lagos, M. (2010). Incorporación de criterios de fragilidad ambiental y riesgo en la planificación territorial de la costa de Chile central. *Revista de Geografía Norte Grande*, (45), 5-20.
- Araneda, A., Stehr, A., Denisse, A., Urrutia, R., & Hidalgo, N. (2020). Capítulo 10: Contextualizando el cambio climático en la región del Biobío: perspectiva pasada, actual y estrategias. *iN EULA-chile evolución y perspectivas a 30 años de su creación*. (pp. 207–225).
- Ayala-Carcedo, F., y Olcina, J. (2002) Riesgos naturales, conceptos fundamentos y clasificación. En: Ayala-Carcedo F., y Olcina, J. (coord.). *Riesgos Naturales*. Barcelona: Ariel S.A.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). *Green infrastructure: linking landscapes and communities*. Island press.
- Bobadilla, A., Stehr, A., & Toro, N. (2023). Evaluation of climate-change impacts on the temporal and spatial behaviour of drought in South-Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2288217>
- Chotin, P. (1969). Geología del área de Tomé. Universidad de Concepción, *Geoandes*, 3, 56.
- Craig, T. (2022). Seismicity and the deformation of subducting slabs. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU22-3965).
- Cucurella, J. (1978). Estudio geológico y radiométrico del valle inferior del río Bío-Bío, Provincia de Concepción, VIII Región (Doctoral dissertation, Universidad de Chile).
- DGA (2011). Estudio hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata. <https://snia.mop.gob.cl/repositorioldga/handle/20.500.13000/5428>
- DGA (2012). Estudio hidrogeológico Cuenca Bío Bío. <https://snia.mop.gob.cl/repositorioldga/handle/20.500.13000/5428>
- DGA (2013). Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Bío Bío. <https://snia.mop.gob.cl/repositorioldga/handle/20.500.13000/5446>
- DGA, (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. Available from: <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5796v1.pdf> [Accessed 15 May 2021].
- Ferraris, F. (1981). Avance geológico Hoja Los ángeles-Angol, Región del Bío-Bío. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, 5, 26.
- Font, E. V. (2019). Cambio Climático Conceptos e impactos. <https://www.leychile.cl/navegar?idNorma=30667>
- Gajardo, A. (1981). Hoja de Concepción-Chillan, Región del Bío-Bío. Instituto de Investigaciones Geológicas, Mapas Geológicos Preliminares 4: 32 p., escala 1:250.000.
- Hoffstetter, R., Fuenzalida, H., & Cecioni, G. (1957). *Lexique Stratigraphique International*, Vol. V, Amérique Latine, Fascicule 7, Chili. Centre National de la Recherche Scientifique, 13, quai Anatole-France, París-VII.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). Censo de Población y Vivienda año 2017. Santiago, Chile.
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo

- geomorfológico: Un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. EURE (Santiago), 27(81). <https://doi.org/10.4067/S0250-71612001008100006>
- Martínez, C., Rojas, O., Aránguiz, R., Belmonte, A., Altamirano, Á., & Flores, P. (2012). Riesgo de tsunami en caleta Tubul, Región del Biobío: Escenarios extremos y transformaciones territoriales posterremoto. *Revista de geografía Norte Grande*, 53, 85-106. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000300006>
- Martínez, C., Winckler, P., Agredano, R., Esparza, C., Torres, I. & Contreras-López, M. (2021). Coastal erosion in sandy beaches along a tectonically active coast: The Chile study case. *Progress in Physical Geography* 2021, Vol. 0(0) 1-22. DOI: 10.1177/03091333211057194.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU. (2023). Bases Técnicas, “Consultoría sobre infraestructura ecológica y riesgo de desastres en un escenario de cambio climático, para la provincia de Concepción.”
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (1992). Ordenanza general de urbanismo y construcciones.
- Munizaga, J., García, M., Ureta, F., Novoa, V., Rojas, O., & Rojas, C. (2022). Mapping Coastal Wetlands Using Satellite Imagery and Machine Learning in a Highly Urbanized Landscape. *Sustainability*, 14(9), 5700. <https://doi.org/10.3390/su14095700>
- Muñoz-Cristi, J. (1946). Estado actual del conocimiento sobre la geología de la provincia de Arauco. In *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas* (Vol. 3, No. 3, pp. ág-30).
- Rinaldi, Arturo, & Bergamini, Kay. (2020). Inclusión de aprendizajes en torno a la gestión de riesgo de desastres naturales en instrumentos de planificación territorial (2005 - 2015). *Revista de geografía Norte Grande*, (75), 103-130. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022020000100103>
- Rojas, O., Latorre, T., Pacheco, F., Araya, M., & López, J. J. (2019). Inundaciones fluviales en cuencas costeras mediterráneas de Chile: recurrencia, factores físicos y efectos hidrogeomorfológicos de su gestión. *La Zona Costera en Chile: Adaptación y Planificación para la Resiliencia*; Geo-Libros UC: Macul, Santiago, 79-103.
- Rojas, O., Mardones, M., Rojas, C., Martínez, C., & Flores, L. (2017). Urban growth and flood disasters in the coastal river basin of South-Central Chile (1943-2011). *Sustainability* (Switzerland), 9(2). <https://doi.org/10.3390/su9020195>
- Romero, H. (2019). Urban climates and the challenge of sustainable development of Chilean cities. In *Urban Climates in Latin America* (pp. 207-256). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4_9
- Salinas, E., & Pérez, L. (2011). Procesos urbanos recientes en el Área Metropolitana de Concepción: Transformaciones morfológicas y tipologías de ocupación. *Revista de geografía Norte Grande*, 49, 79-97. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000200006>
- Smith, P., & Romero, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lenga. *Revista de geografía Norte Grande*, 43. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022009000200005>
- SUBDERE, (2011). Guía análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), Gobierno de Chile, 147pp
- Sylvester, C., & Sangüesa, C. (1948). Contribución a la geología de la bahía de Concepción. *Minerales*, Vol. 3, No. 25, 53-57. Theurer, M. M., Jiménez, J. V., Velasco, G. M., & Zambrano, I. B. (2017). Análisis sobre la recurrencia de terremotos severos en Ecuador. *Prisma tecnológico*, 8(1), 12-17.
- Wetzel, W. (1930). Die Quiriquina-Schichten als Sediment und paläontologisches archiv.

Palaeontographica (1846-1933), 49-106.

Willner, A. P., Thomson, S. N., Kröner, A., Wartho, J. A., Wijbrans, J. R., & Hervé, F. (2005). Time markers for the evolution and exhumation history of a Late Palaeozoic paired metamorphic belt in North-Central Chile (34–35 30' S). *Journal of Petrology*, 46(9), 1835-1858.