



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE  
Y ENERGÍA NATURAL



**AMEXCID**  
AGENCIA MEXICANA  
DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL  
PARA EL DESARROLLO

FONDO DE COOPERACIÓN  
**MÉXICO  
CHILE**

**agciChile**  
Cooperación Chilena para el Desarrollo  
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERNALES



**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
TEMUCO**



EVALUACIÓN DE SERVICIOS

# ECOSISTÉMICOS

Y DE RIESGOS POR CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE

# CHILE Y MÉXICO



Portada: *Atthis heloisa* (Zumbador mexicano). Hábitat: Montaña, residente en la Cuenca del Río Magdalena. Autor: Acuarela de Paola Morales Trosino y Omar Hernández Acosta, basada en fotografía de <https://i.pinimg.com/originals/04/0a/c9/040ac918c430d532cc173704d73bf03a.jpg>. Fuente: CONABIO.

Contraportada: *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch. Hábitat: se encuentra en la Cordillera de los Andes y en la cordillera de Nahuelbuta, desde la Región del Biobío hasta la vertiente sur del Volcán Villarrica en la Región de los Lagos.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS CONFORME A LA LEY. SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DEL MISMO SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL AUTOR.

EVALUACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y DE RIESGOS POR CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE CHILE Y MÉXICO

Participantes de Chile:

Calfucura Trecaman G., Encina Montoya F., Esse Herrera C, Etcharren Ulloa P., Hernández Guzmán M., Huico Malhue A., y Santander Massa R.

Participantes de México:

Caso M., Domínguez Olivo K.F., García Meneses P.M., Gómez Aiza L., González Terrazas D.I., Gress Carrasco F., Hernández Montoya I., Machorro Reyes J., Montes Rojas R.T., López Díaz F., Nava Assad Y.S., Enríquez Guadarrama C., Ruiz Bedolla K., Toscano Alatorre A.L. y Vermondén Thibodeau A.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC  
Dirección: Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, Código Postal 14210, Ciudad de México  
Teléfono: 01 55 5424 6400

Contacto: margarita.caso@inecc.gob.mx

Para descargar online busca la liga del proyecto en la página

<https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/adaptacion-al-cambio-climatico-91027>

IMPRESO EN MÉXICO - PRINTED IN MEXICO

Queda rigurosamente prohibido, sin la autorización escrita del editor, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo público.

Diseñado por: Paola Morales Trosino  
Impreso por: Strong Estrategias S. de RL. de CV.  
Dirección: Atlético de Bilbao No. 7, Col. Arboledas del Sur, Tlalpan. Ciudad de México.  
Teléfonos: 5339.5706 o 5659.1754  
[ventas@strongmx.com](mailto:ventas@strongmx.com)



INECC  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO

SEMARNAT  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



AMEXCID  
AGENCIA MEXICANA  
DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL  
PARA EL DESARROLLO

FONDO DE COOPERACIÓN  
MÉXICO  
CHILE

agciChile  
Cooperación Chilena para el Desarrollo  
MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES

UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
TEMUCO



# ÍNDICE

---

PRESENTACIÓN CHILE Y MÉXICO.....	4
1.-INTRODUCCIÓN.....	6
2.-CUENCA DEL LAGO DE VILLARRICA, CHILE	
<b>2.1. IDENTIFICACIÓN Y ESPACIALIZACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....</b>	<b>8</b>
2.1.1.METODOLOGÍA.....	9
2.1.2.RESULTADOS.....	9
<b>2.2. CUANTIFICACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HIDROLÓGICOS.....</b>	<b>12</b>
2.2.1.METODOLOGÍA.....	13
2.2.2.RESULTADOS.....	14
<b>2.3. RIESGOS POR CAMBIO CLIMÁTICO ASOCIADO A INUNDACIONES Y SEQUÍA.....</b>	<b>16</b>
2.3.1.METODOLOGÍA.....	17
2.3.2.RESULTADOS.....	17
<b>2.4. IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS AL CAMBIO CLIMÁTICO...19</b>	
2.4.1.METODOLOGÍA.....	20
2.4.2.RESULTADOS.....	21
<b>2.5.IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN LOCAL AL CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>23</b>
2.5.1.METODOLOGÍA.....	24
2.5.2.RESULTADOS.....	24
3.-CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, MÉXICO	
<b>3.1. SERVICIO DE SOPORTE DE BIODIVERSIDAD.....</b>	<b>25</b>
3.1.1.METODOLOGÍA.....	26
3.1.2.RESULTADOS.....	27
<b>3.2. SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PROVISIÓN DE AGUA.....</b>	<b>29</b>
3.2.1.METODOLOGÍA.....	30
3.2.2.RESULTADOS.....	30
<b>3.3. VARIABILIDAD CLIMÁTICA (EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS).....</b>	<b>33</b>
3.3.1.METODOLOGÍA.....	34
3.3.2.RESULTADOS.....	35
4.-LECCIONES APRENDIDAS.....	37
5.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
6.-BIBLIOGRAFÍA.....	41

# PRESENTACIÓN CHILE Y MÉXICO

---

El estado ambiental global, está exigiendo a la humanidad el replantearse el cómo queremos o debemos seguir desarrollándonos como sociedad, pero a la vez, disminuir la pobreza, avanzar en ciudades más sostenibles, proteger los ecosistemas terrestres y acuáticos, conservar la biodiversidad y el patrimonio genético, disminuir la contaminación, adaptarnos al cambio climático, entre otros tantos retos.

El presentar este resumen ejecutivo del proyecto “Evaluación de servicios ecosistémicos y de riesgos por cambio climático en cuencas hidrográficas de Chile y México” representa para el Ministerio del Medio Ambiente y esta SEREMI de Medio Ambiente un gran logro y orgullo, ya que este proyecto nació y se desarrolló en la región de La Araucanía, lo que da cuenta del permanente esfuerzo que las regiones hacen para avanzar en el conocimiento, valorización y la protección del medio ambiente y sus servicios ecosistémicos. El Fondo Conjunto de Cooperación Chile-México, ha permitido el desarrollo de esta y otras iniciativas, que en su conjunto apuntan a mejorar la calidad de vida de Chilenos y Mexicanos, es importante destacar que estos países han decidido avanzar en un trabajo colaborativo, en que las diferencias culturales, de formación profesional, de diversidad de territorios, sólo representan oportunidades de aprendizaje, de reconocimiento y de valorización mutua.

Esperamos que este proyecto sea un punto de partida en el conocimiento, el desarrollo de metodologías y en el diseño de estrategias a ser replicables en otras regiones del país, cuyos resultados, sean claves para la toma de decisiones, el desarrollo sostenible, y la implementación de medidas de adaptación al cambio climático.

## **DR. MARCELO MENA CARRASCO, SUBSECRETARIO DE MEDIO AMBIENTE**

México es un país altamente vulnerable a los efectos derivados del cambio climático. Su ubicación y orografía propician la exposición a diferentes fenómenos meteorológicos, a lo que se suman condiciones de desigualdad social y económica. Esta vulnerabilidad pone en riesgo la seguridad de la población y la conservación de los ecosistemas. Por su parte, Chile comparte con nuestro país esta condición de vulnerabilidad, ya que se espera que sea impactado de manera significativa por los fenómenos asociados al cambio climático particularmente en sus recursos hídricos y su biodiversidad.

En el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, consideramos importante la cooperación internacional, particularmente con otros países de América Latina; un ejemplo de esto es la colaboración con la Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente de la Araucanía, en el proyecto “Evaluación de servicios ecosistémicos y de riesgos por cambio climático en cuencas hidrográficas de Chile y México”, el cual permitió - mediante jornadas presenciales y a distancia - compartir e intercambiar conocimientos y experiencias en temas como evaluación de la vulnerabilidad, escenarios de cambio climático, servicios ecosistémicos en cuencas hidrográficas, y la identificación de medidas de adaptación que ayudan a disminuir la vulnerabilidad y que son fundamentales en la planeación territorial considerando un clima cambiante.

El presente documento representa el aprendizaje mutuo y el esfuerzo de las instituciones involucradas, por desarrollar trabajos de investigación e innovación, fundamentales para la adaptación al cambio climático.

## **DRA. MARGARITA CASO CHÁVEZ, COORDINADORA GENERAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO, INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO**

## AGRADECIMIENTOS

---

El Ministerio del Medio Ambiente y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, expresan su más amplio agradecimiento al Fondo de Conjunto de Cooperación Chile-México, así como a las instancias de coordinación e implementación, la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID), de la Secretaría de Relaciones Exteriores de México y a la Agencia de Cooperación Internacional de Chile (AGCI), por la confianza y su permanente apoyo para el desarrollo de este proyecto en ambos países.

Expresamos nuestro más amplio reconocimiento y gratitud a los funcionarios e investigadores de la Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente de la Araucanía, de la Universidad Católica de Temuco y de la Coordinación de Adaptación al Cambio Climático del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, así como a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) por sus valiosas aportaciones de información y metodologías para el cumplimiento de los diferentes productos de este proyecto.

# 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mensajes claves del 5° Informe de Evaluación del Clima (AR5, 2013/14), del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), indica que “la influencia humana en el sistema climático es clara y va en aumento, y sus impactos se observan en todos los continentes. Si no se le pone freno, el cambio climático hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles en las personas y los ecosistemas. Sin embargo, existen opciones para la adaptación al cambio climático y con actividades de mitigación rigurosas, se puede conseguir que los impactos del cambio climático permanezcan en un nivel controlable, creando un futuro más claro y sostenible”.

La adaptación al cambio climático es un proceso heterogéneo, que no solo depende del desarrollo económico y tecnológico de un país, sino más bien de los factores culturales e institucionales, los cuales tienen un rol fundamental al momento de la elaboración e implementación de medidas de adaptación a nivel local. En base a estas necesidades se han definido acciones transversales, para la adaptación al cambio climático en Chile y México, siendo uno de los retos más grandes, el carácter de transversalidad y multidimensional así como su aplicación en contextos territoriales distintos.

En este contexto, la Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente de la Región de La Araucanía junto con la Universidad Católica de Temuco en Chile, y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en México, desarrollaron el proyecto: “Evaluación de Servicios Ecosistémicos y de riesgos por cambio climático en cuencas hidrográficas de Chile y México” financiado por el Fondo Conjunto de Cooperación Chile-México, fruto del Acuerdo de Asociación Estratégica firmado entre La República de Chile y los Estados Unidos Mexicanos en el año 2006.

Este proyecto tuvo por objetivo intercambiar experiencias y metodologías que permitieron la identificación de presiones e impactos sobre los servicios ecosistémicos, la disponibilidad del recurso hídrico, los riesgos por cambio climático e identificación de algunas medidas de adaptación locales en cuencas hidrográficas de Chile y México, además del fortalecimiento de capacidades para el desarrollo e implementación de políticas públicas.




El proyecto promovió el fortalecimiento de capacidades para fomentar la colaboración en el sector público, en la elaboración de programas y planes en materia de adaptación al cambio climático, puesto que estrechó vínculos y contacto entre los organismos participantes mediante seminarios y presentaciones que apuntaron a generar capacidades y oportunidades en los municipios y las instituciones y organizaciones del estado, que si bien no fueron partícipes directos en el proyecto, participan de la gestión de recursos hídricos y reconocen los impactos del cambio climático y la vulnerabilidad frente a eventos extremos derivados de este fenómeno. Mediante las actividades realizadas entre ambos países, se espera un efecto multiplicador que permita también su durabilidad en el tiempo tanto a escala internacional, nacional, regional o estatal y local.

Para lograr los objetivos planteados, en Chile, se seleccionó como área de estudio la subcuenca del Lago Villarrica que se ubica en la zona lacustre de la región de La Araucanía. Esta subcuenca, se encuentra ubicada en la fracción media-alta de la cuenca del Toltén, localizada entre las comunas de Villarrica, Pucón, Curarrehue y Cunco. En esta área de estudio las principales actividades económicas son la acuicultura y el turismo, y en menor grado la actividad forestal-maderera. En esta cuenca, fueron identificados los servicios ecosistémicos de provisión tales como la pesca y acuicultura, agua para generación de energía, agua para irrigación, agua para consumo humano, los cuales directamente se verán impactados por los efectos del cambio climático. Asimismo, como servicio ecosistémico es posible considerar la regulación de concentraciones de contaminantes y nutrientes provenientes de la cuenca hidrográfica, tales como las fuentes difusas que impactan finalmente en el lago Villarrica, así como a los principales ríos que forman

parte de la red hídrica que alimenta dicho lago. Finalmente, señalar que la subcuenca del lago Villarrica, cuenta con una importancia referida a los servicios ecosistémicos culturales, así como de experiencias de turismo, belleza escénica, y todo tipo de actividades recreativas.

En el caso de México, la cuenca de estudio seleccionada fue la Cuenca del Río Magdalena, localizada al sur poniente de la Ciudad de México, sus límites se extienden por tres delegaciones Álvaro Obregón, La Magdalena Contreras y Cuajimalpa. El río es uno de los cuerpos de agua más importantes para la ciudad ya que se emplea como fuente de abastecimiento de agua potable, además de considerarse como uno de los últimos ríos permanentes de la ciudad<sup>1</sup>. Una característica relevante es, la presencia en la cuenca de tres de los cuatro tipos de bosque templado más importantes y representativos del país, bosque de *Quercus sp.*, bosque de *Pinus hartwegii* y bosque de *Abies religiosa*, en un espacio relativamente pequeño y dentro de un intervalo altitudinal reducido (2, 500-3, 870 msnm)<sup>2</sup> que mantienen una gran diversidad de flora y fauna. Esta cuenca provee de servicios ecosistémicos de provisión como agua, alimento, madera y productos no maderables; entre los de regulación se pueden mencionar el control de la erosión y mantenimiento del suelo, el almacenamiento de nutrientes, control de plagas y enfermedades, control de sequías, el almacenamiento de carbono, el control de inundaciones y remoción en masa y la calidad del agua; mientras que para los culturales, cuenta con belleza escénica, ecoturismo, educación y herencia cultural<sup>3</sup>. La cuenca ha sido objeto de varios estudios que derivan de su importancia como la del suministro de agua potable para la población, sin embargo en estos estudios no se ha considerado el impacto del cambio climático sobre este y los demás servicios ecosistémicos que provee la cuenca.

Este documento presenta el trabajo desarrollado por funcionarios de la SEREMI del Medio Ambiente y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Para el cumplimiento de sus objetivos, se han constituido los siguientes apartados:

-  **Metodologías y resultados**, en este apartado se describen los principales procedimientos y resultados que cada una de las instituciones ha aplicado en los temas de variabilidad climática (eventos climáticos extremos), provisión de agua y soporte de la biodiversidad para el caso de la cuenca del río Magdalena; por su parte para la cuenca del Lago de Villarrica se presentan los métodos para la identificación y espacialización de los servicios ecosistémicos, la cuantificación de servicios ecosistémicos hidrológicos, la determinación de la vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos frente a las amenazas del cambio climático y la identificación de medidas de adaptación local al cambio climático.
-  Se ha incluido un apartado para presentar las **lecciones aprendidas**, como parte del conocimiento adquirido tanto durante el intercambio de experiencias como en el desarrollo de cada una de las etapas de este proyecto, con esto se busca que la información sea de utilidad para quien se enfrente a un proyecto similar, de modo que pueda afrontarlo con cierta preparación.
-  Finalmente se presentan las principales **recomendaciones y conclusiones** que surgieron durante la ejecución del proyecto.

<sup>1</sup>Cantoral, E., Almeida, L., Cifuentes, J., León, L., Martínez, A., Mendoza, P., Villarruel, J., Aguilar, V., Ávila, V., Olgún, H., y Puebla F. (2009). La biodiversidad de una cuenca en la ciudad de México. Ciencias, Núm.94, abril-junio, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 28-33. <sup>2</sup>SMA-GDF (2012). Programa de Rescate Integral de los ríos Magdalena y Eslava. <sup>3</sup>Almeida L., Nava M., Ramos A., Espinosa, M., Ordoñez M. y Jujnovsky J. (2007). Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Gaceta Ecológica. , Núm. 54-85, julio-diciembre, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. pp. 53-64.

A landscape photograph of Lago Villarrica in Chile. The foreground shows dark, pebbly shorelines. The middle ground is dominated by the calm, blue water of the lake. In the background, there are dark, forested mountains under a clear blue sky.

## 2. CUENCA DEL LAGO DE VILLARRICA, CHILE

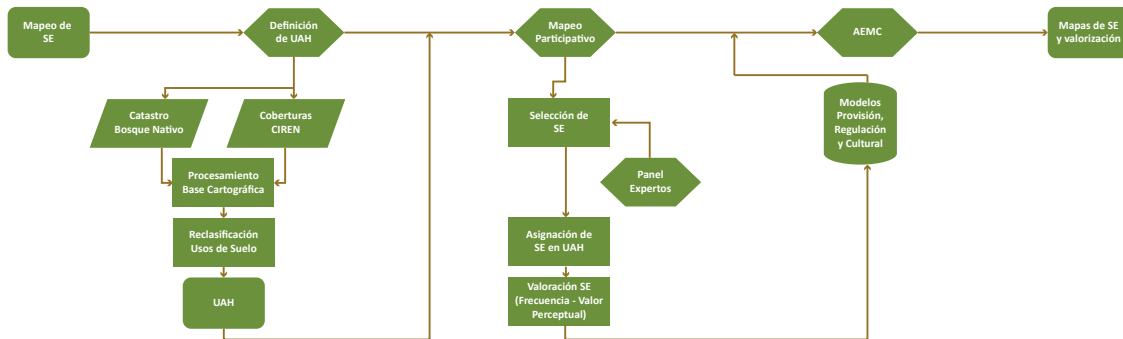
### 2.1. IDENTIFICACIÓN Y ESPACIALIZACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.

Para la identificación y espacialización de los servicios ecosistémicos se consideraron las aproximaciones metodológicas propuestas por Esse et al., (2014), en las cuales se otorga valor al territorio y dentro de él, se identifican aquellos servicios ecosistémicos agrupados en las categorías de provisión, regulación y culturales (Figura 2.1).



## 2.1. IDENTIFICACIÓN Y ESPACIALIZACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

### 2.1.1. METODOLOGÍA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA



**Figura 1.** Flujo metodológico para la identificación y mapeo de servicios ecosistémicos (Esse et al., 2014).

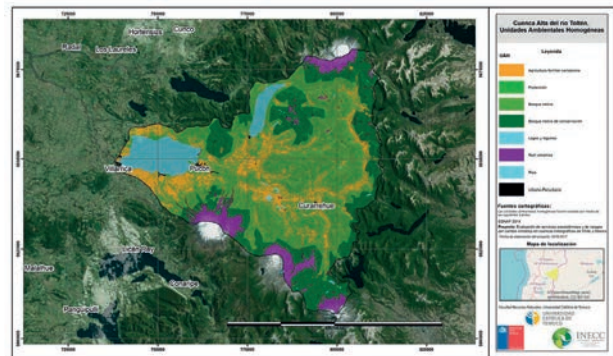
En la primera etapa, se definieron unidades ambientales homogéneas (UAH), a partir de las cuales se identificaron los servicios ecosistémicos más relevantes. Para dicho análisis, se utilizaron diversas bases cartográficas como el Catastro Nacional de los Recursos Vegetacionales de Chile (CONAF et al., 1999) y las coberturas del Centro de Investigación de los Recursos Naturales de Chile (CIREN, 2003). La definición de las UAH se basó en la metodología propuesta por Gómez-Orea (1999), quien define cuatro vectores de valorización y un conjunto de criterios que permiten determinar el valor total del territorio, rescatando la percepción de los habitantes y actores locales del área estudiada. Los vectores de valorización corresponden a las dimensiones: (1) ecológica, (2) productiva, (3) paisajística, y (4) cultural. La valorización de cada vector, asignada por un panel de expertos, permite crear un modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC).

### 2.1.2 RESULTADOS

El área de estudio mostró siete unidades ambientales homogéneas (UAH) (Tabla 2.1), las cuales fueron identificadas y caracterizadas por los actores que participaron en los talleres de trabajo y representan áreas de relevancia dentro de la cuenca que presentan continuidad espacial (Ver Figura 2.2).

Nº	UAH	Superficie (km²)
1	Urbano - Periurbano	9.84
2	Red volcánica	197.60
3	Agricultura familiar campesina	10.64
4	Lagos y Lagunas	273.92
5	Bosque nativo	1,328.76
6	Bosque nativo de conservación	667.61
7	Área ripariana	191.91

**Tabla 2.1.** Unidades Ambientales Homogéneas Definidas para la cuenca del lago Villarrica.



**Figura 2.2.** Representación de las Unidades Ambientales Homogéneas definidas para la cuenca del lago Villarrica.

### Descripción de las UAH

- La red volcánica**, se consideró como una unidad homogénea de relevancia en términos de la provisión de servicios ecosistémicos, valor paisajístico y turístico.
- La agricultura familiar campesina**, se consideró como aquellas áreas rurales de la zona media de la cuenca, en la cual existen predios de tamaño medio con agricultura no intensiva y que además son áreas vulnerables al cambio climático, ya que existe fuerte dependencia de la disponibilidad del recurso hídrico en cantidad y calidad para la subsistencia.
- En cuanto al bosque**, este se diferenció entre el bosque nativo (el cual está presente en gran parte de la zona media alta de la cuenca) y además se diferenció en el bosque nativo de conservación, entendido como aquel que se encuentra dentro de alguna de las áreas del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado de Chile (SNASPE).
- Las superficies de cada UAH identificada**, muestran un predominio del bosque nativo y el bosque nativo de conservación en la cuenca, este último inserto en las áreas SNASPE, principalmente en Parque Nacional Villarrica, Parque Nacional Huerquehue y la Reserva Nacional Villarrica.
- El bosque nativo**, se encuentra presente en toda la cuenca, principalmente asociado a las áreas buffer de las áreas silvestres protegidas y en la zona central de las comunas de Curarrehue y Pucón, presentando menor superficie en la comuna de Villarrica. El área de agricultura familiar campesina, se encuentra mayormente representada en las comunas de Villarrica y Curarrehue, aledaña a los cauces principales de la red hídrica de la cuenca, que es en donde actualmente se concentra el desarrollo campesino de subsistencia.
- Los resultados mostraron que la cuenca bajo estudio**, presenta un alto valor ecológico en prácticamente todo el territorio, siendo esta la percepción que los actores relevantes poseen sobre el área, ello coincide con la calidad de los distintos escenarios que están presentes y que demandan por parte de la sociedad información para fines educativos y científicos.
- En cuanto al valor del paisaje**, este se ve con tendencia a un nivel medio a alto, sobre todo en las áreas que corresponden al SNASPE. Desde el punto de vista del valor productivo, este evidenció un valor medio, centrado principalmente en la actividad turística y forestal.
- Finalmente, el valor social del territorio alcanzó valores generales que van de medio a alto**, esta clasificación alta del valor se concentró en la parte alta de la cuenca y las subcuencas presentes, siendo las áreas SNASPE las más significativas, junto a los grandes cuerpos de agua (lagos y lagunas). (Figura 2.3)

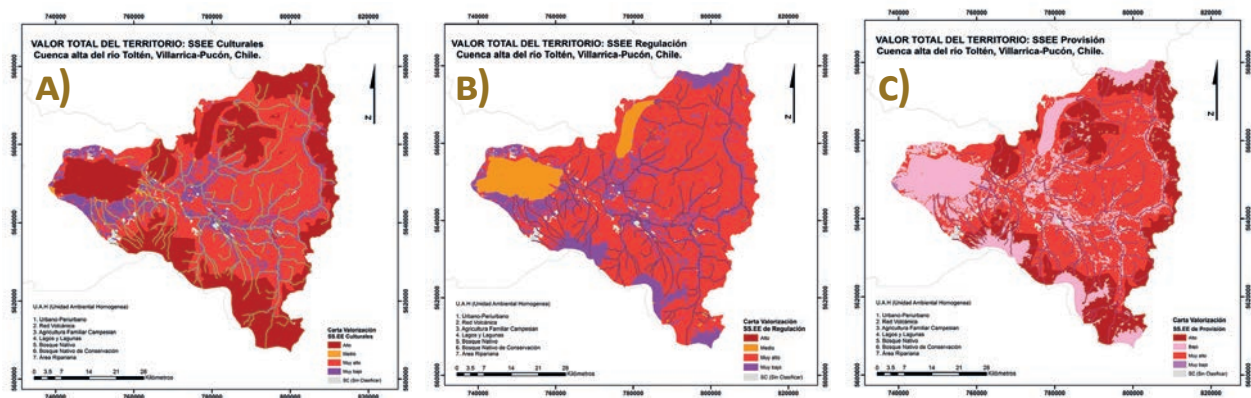
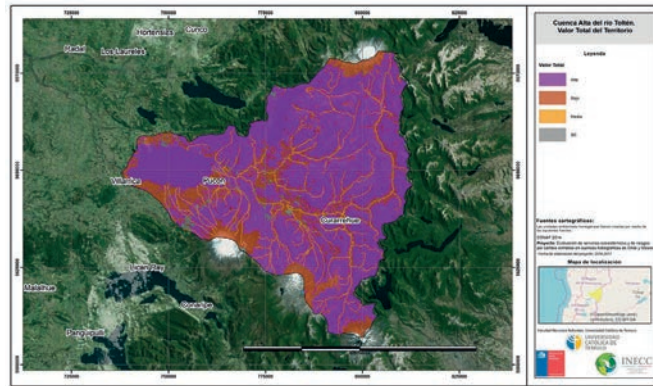


Figura 2.3. Expresiones cartográficas del valor del territorio para la cuenca alta del Lago Villarrica. Valor total del territorio en función de los SSEE de: a) Culturales; b) Regulación; c) Provisión.

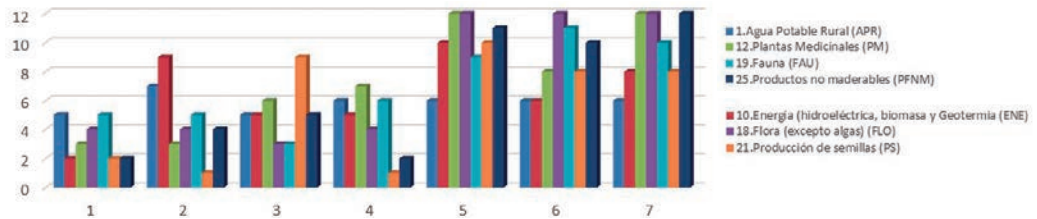
Finalmente, con la información integrada, se obtuvo el valor total del territorio (Figura 2.4). Lo anterior, permitió asociar a cada UAH los distintos servicios ecosistémicos presentes en la cuenca del Lago Villarrica, mostrando claramente la percepción que poseen los actores claves del territorio, asignando un alto valor al bosque nativo de conservación presente en las áreas SNASPE, quedando en un segundo nivel la presencia de lagos y lagunas y el bosque nativo, los cuales son considerados en la zona, ambientes altamente antropizados.

**Figura 2.4.** Valor total del territorio, cuenca del Lago Villarrica



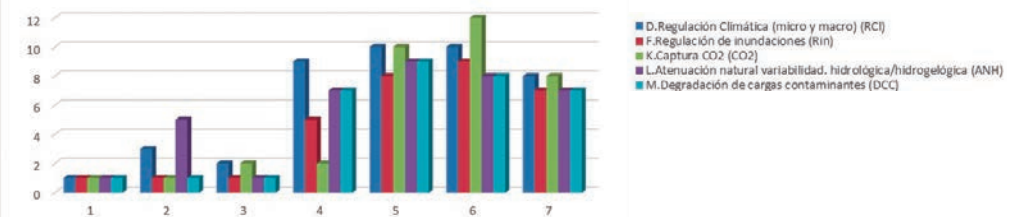
La información anterior, permitió desarrollar el taller con actores relevantes del territorio, quienes validaron las UAH y procedieron a asignar los distintos servicios ecosistémicos a cada una de ellas. Se realizaron dos talleres, uno en la ciudad de Temuco y otro en la ciudad de Villarrica, el número total de participantes fue de 14 personas, más los investigadores del proyecto. Los resultados mostraron un total de siete servicios de Provisión, cinco de Regulación y siete servicios Culturales. En la Figura 2.5, es posible observar que la mayor frecuencia de SSEE de provisión, se encontró en las UAH 5, 6 y 7, asociadas a bosque nativo, bosque nativo de conservación y área ripariana.

**Figura 2.5.** Frecuencia de los SSEE de provisión cuenca del lago Villarrica.



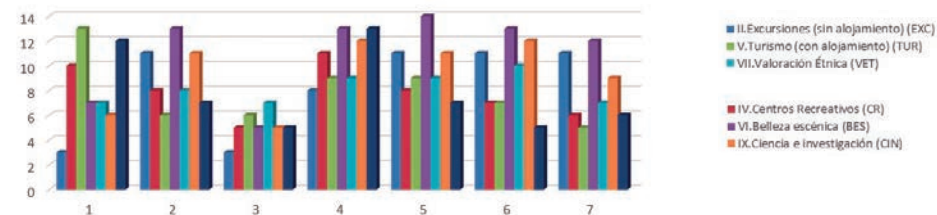
En la Figura 2.6, es posible observar que la mayor frecuencia de SSEE de regulación se encontró en las UAH 5, 6 y 7, asociadas a bosque nativo, bosque nativo de conservación y área ripariana.

**Figura 2.6.** Frecuencia de los SSEE de regulación cuenca del lago Villarrica.



De la Figura 2.7, es posible observar que la mayor frecuencia de SSEE culturales se encontró homogeneidad en las UAH 1, 2, 4, 5, 6 y 7, a excepción de la UAH 3 (agricultura familiar campesina).

**Figura 2.7.** Frecuencia de los SSEE culturales cuenca del lago Villarrica.





## 2. CUENCA DEL LAGO DE VILLARRICA, CHILE






### 2.2. CUANTIFICACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HIDROLÓGICOS.

Para evaluar el impacto del cambio climático en la provisión hídrica se utilizó como herramienta de evaluación el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Se realizó un análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo a través de los índices estadísticos NSE y  $R^2$ , PBIAS.

## 2.1. CUANTIFICACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HIDROLÓGICOS.






### 2.2.1. METODOLOGÍA

Se evaluó la provisión hídrica mediante el cálculo del coeficiente de escorrentía (cociente entre caudal y precipitación) en dos escenarios: actual y escenario futuro con efecto cambio climático, basado en la integración de modelos propuestos por MMA (2016). Las actividades establecidas para el cumplimiento de este objetivo fueron:

-  **Recopilar información básica y preparación de archivos** necesarios como INPUT para su ingreso al modelo hidrológico;
-  **Generación de información cartográfica** (*grids y shapes*) para incorporar a la modelación;
-  **Efectuar la modelación hidrológica de la cuenca del lago Villarrica**, desarrollando primero la calibración del modelo a emplear y luego su validación para diferentes series de tiempo.
-  **Obtención y análisis de resultados producto de la modelación hidrológica** de la cuenca del lago Villarrica.
-  **Generación de cartografía** con resultados de la modelación efectuada por subcuencas.

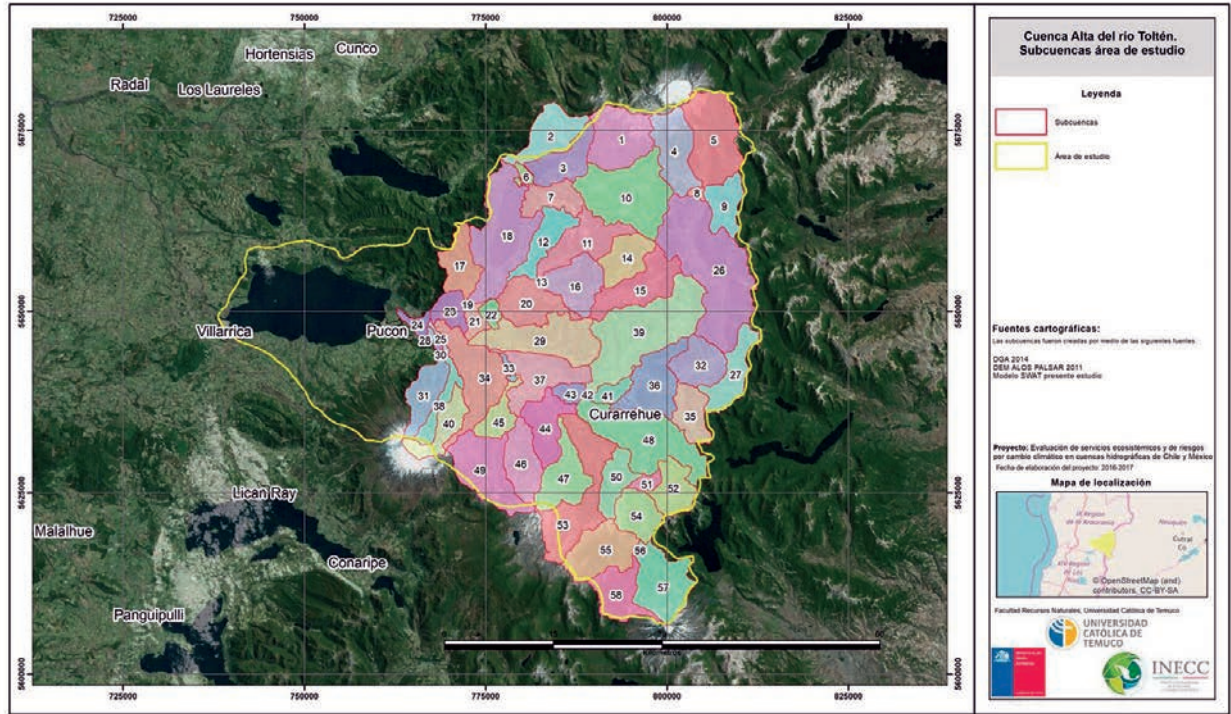
Se consideró el uso de las bases de datos disponibles (meteorológicas, fluviométricas, de uso de suelo, series de suelo, entre otras) y las adaptaciones a datos locales para la región que se han efectuado en investigaciones anteriores. El modelo SWAT considera el principio teórico del balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, modelando la respuesta hídrica en base a la siguiente ecuación:

Donde:  $WYLD = PP - ET - \Delta SW - (PERC - GWQ)$  [1]

-  **WYLD:** Cantidad de agua en la subcuenca (incluye escorrentía superficial, flujo lateral y caudal base).
-  **PP:** Precipitación.
-   **$\Delta SW$ :** Cambio en el contenido de agua del suelo (zona vadosa).
-  **PERC:** Caudal hacia agua subterránea.
-  **GWQ:** Caudal Base contribuido al caudal total.

### 2.2.2 RESULTADOS

Para la modelación fueron utilizados insumos como la elevación, hidrografía, series y usos de suelo. Se identificaron además 108 unidades de respuesta hidrológica (HRU) y 58 subcuencas, representados en la Figura 2.8.



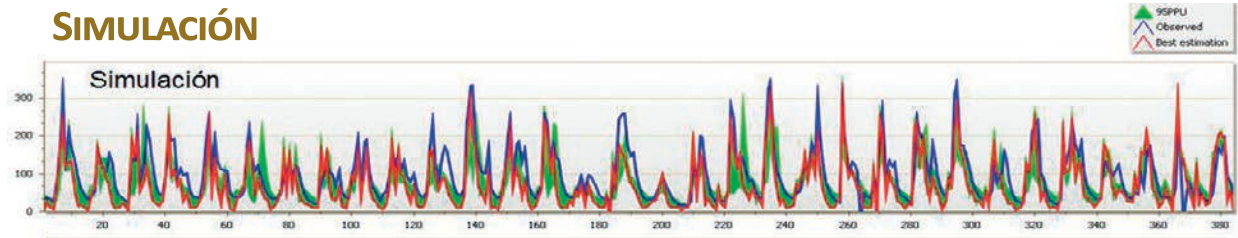
**Figura 2.8.** Identificación de unidades de respuesta hidrológica (HRU) y subcuencas.

La Tabla 2.2, muestra los valores de los índices estadísticos NSE y  $R^2$  evaluados en base a los criterios de Van Liew *et al.*, 2005. La eficiencia del modelo resultó buena para  $R^2$  y NSE en cuanto al ajuste de los caudales medidos y simulados. Los períodos de simulación y calibración se indican en la Figura 2.9.

	Período	NSE	Eficiencia	$R^2$	Eficiencia
Simulación	1989-2013	0.49	Bueno	0.65	Bueno
Calibración	1982-2013	0.66	Bueno	0.79	Bueno

**Tabla 2.2.** Evaluación de índices estadísticos, según Van Liew *et al.* (2005)

## SIMULACIÓN



## CALIBRACIÓN

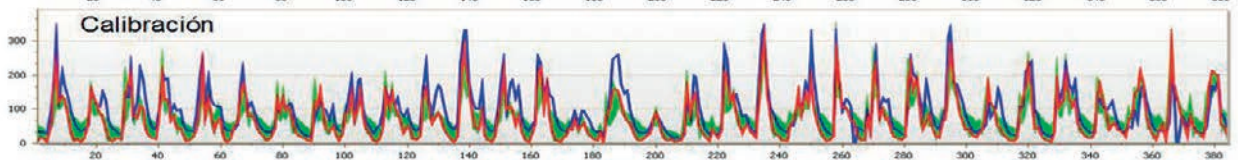


Figura 2.9. Período de calibración de caudales observados y medidos.

Posterior a la calibración del modelo, se estimaron los caudales a partir de la incorporación de las anomalías a la precipitación y temperatura, tomando en consideración los estudios de la U. De Chile, 2012; Dirección Meteorológica de Chile (DMC), y el estudio “Base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980 - 2010) y proyección al año 2050” del MMA. Nuestros resultados indican una disminución promedio del caudal de un 11% (Figura 2.10).

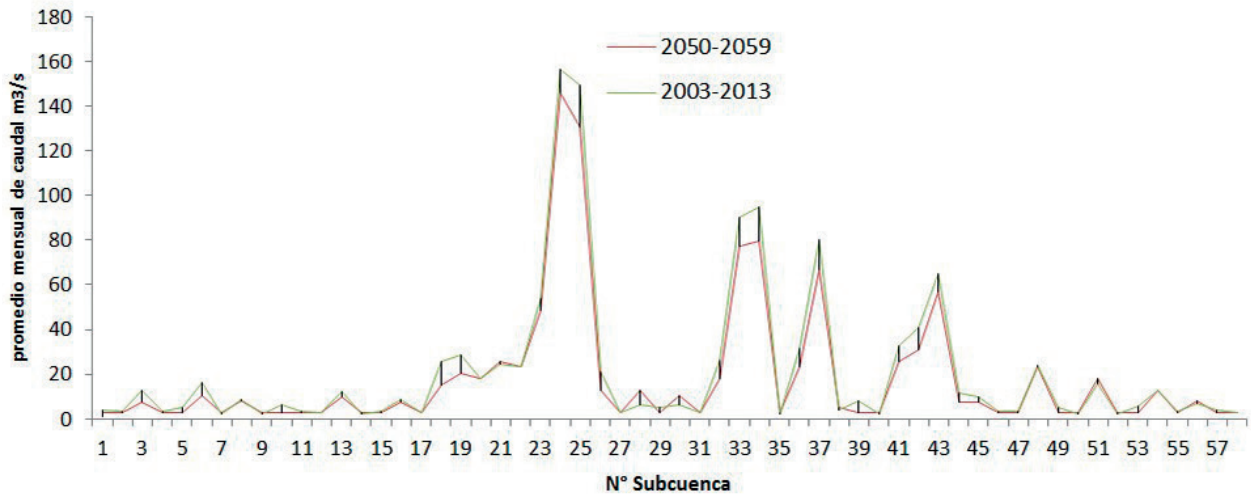


Figura 2.10. Comparación promedios mensuales períodos: 2003-2059 versus 2050-2059.




## 2. CUENCA DEL LAGO DE VILLARRICA, CHILE

### 2.3. DETERMINACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES Y SEQUÍA.




## 2.3. DETERMINACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES Y SEQUÍA.

### 2.3.1. METODOLOGÍA

 **Inundaciones.** El análisis de amenazas por inundaciones se llevó a cabo según lo establecido por Pedraza (1996). Considerando los siguientes aspectos:


1. **Análisis del funcionamiento** del proceso (medio físico natural);
2. **Delimitación y zonificación de su alcance** (medio físico natural); analizar la implicancia socioeconómica del proceso.

Para la identificación y análisis de las variables que influyen en el desencadenamiento de las crecidas, se realizó un análisis de la información referida al clima y la hidrografía de la cuenca, a partir de información bibliográfica secundaria, como los estudios de Martínez (1986), IHL (1991), Ferrando (1994), Fernandez (1995), Aparicio (1999), Lawrence (1999) e INBAR (2000). El área de influencia de la crecida se analizó fundamentalmente la geomorfología, caracterizada a través de un modelo de elevación digital (DEM), obtenido de imágenes satelitales Landsat-8, a partir del cual se generó un modelo de pendientes del terreno para el modelamiento morfológico de la cuenca. La zonificación de las áreas inundables, se realizó a través de los atributos de la capa vectorial relacionada con las características de drenaje y si presentaba antecedentes de anegamiento. Se validó la información en terreno.

 **Sequía.** Para la definición de las áreas con mayor amenaza de sequía, se utilizó la información pluviométrica de la cuenca, la cual fue elaborada con base en datos estadísticos de precipitaciones mensuales y anuales de los últimos 30 a 40 años, a través de 8 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del lago Villarrica; 6 en su interior y 2 exteriores próximas su límite. Para la representación espacial de los valores de precipitación de las 8 estaciones pluviométricas y las isoyetas correspondientes de estos datos, se hizo uso de sistemas de información geográfica (SIG), a través del software Arcgis 10.1. Las etapas correspondientes para el análisis de la sequía, fueron:

1. **Revisión y descarga de datos pluviométricos mensuales y anuales;** Identificación y selección de métodos para completar datos pluviométricos; Cálculo y obtención de datos climáticos de precipitación; Análisis de datos v/s años de fenómeno La Niña.
2. **Lectura y revisión bibliográfica;** Identificación de índices; análisis y comparación de índices; selección de índice.
3. **Aplicación del índice;** obtención y análisis de resultados; elaboración cartográfica de áreas de amenaza.

### 2.3.2 RESULTADOS

 **Inundaciones.** Se obtuvo una cartografía de síntesis en la cual se cartografió las áreas inundables por desborde de cauces y anegamiento. Obteniéndose como resultado una superficie de inundación de alrededor a las 22.741,4 hectáreas, especializadas en la Figura 2.11. Debido a la escala de trabajo los límites del área fueron aproximados, por lo que un estudio a detalle por municipio tiene que realizarse a una escala grande y con modelamiento hidráulico.

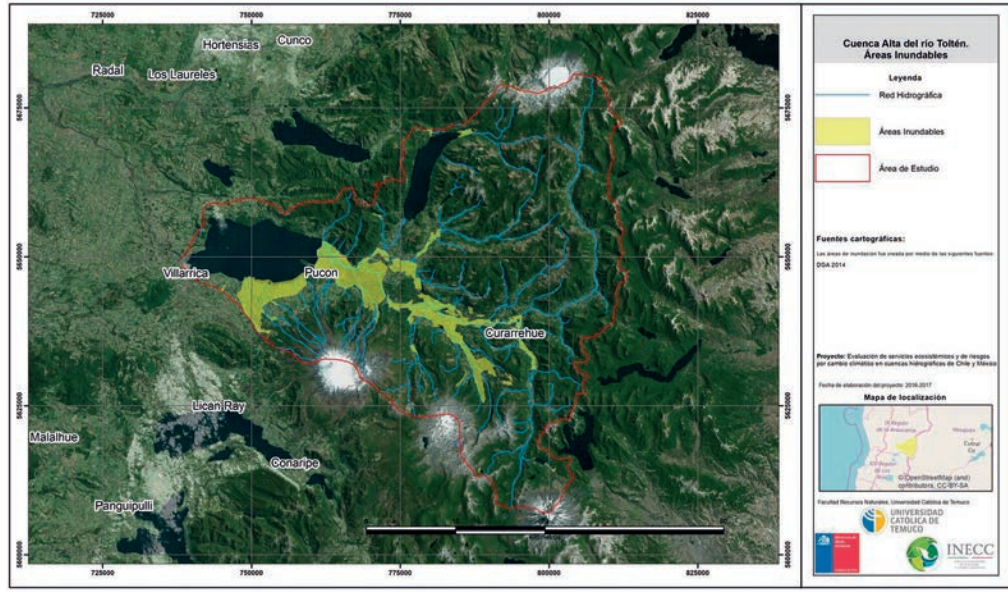


Figura 2.11. Áreas inundables en la cuenca alta de Villarica.

🌿 **Sequía meteorológica.** Para el análisis de amenaza de sequía, se consideró el año 1998, (el más seco de las últimas décadas), donde el inicio del evento de La niña 1998-2000 fue catastrófico para el país y la cuenca en términos de precipitación, y por ende, de sequía meteorológica. De la Figura 2.12, se puede observar como toda el área de estudio se ve afectada con sequía fuerte, aguda e intensa, como en el sector sudoriental. En donde la estación de Puesto, registró un déficit casi un 76%. En otras palabras, en ese sector precipitó menos incluso que la cuarta parte (1/4) de lo llueve en un año normal. Los sectores en donde se haya los suelos urbanos de las 3 comunas, fueron los menos afectados por este evento, pero igual con valores críticos de sequía, con déficits superiores al 40%.

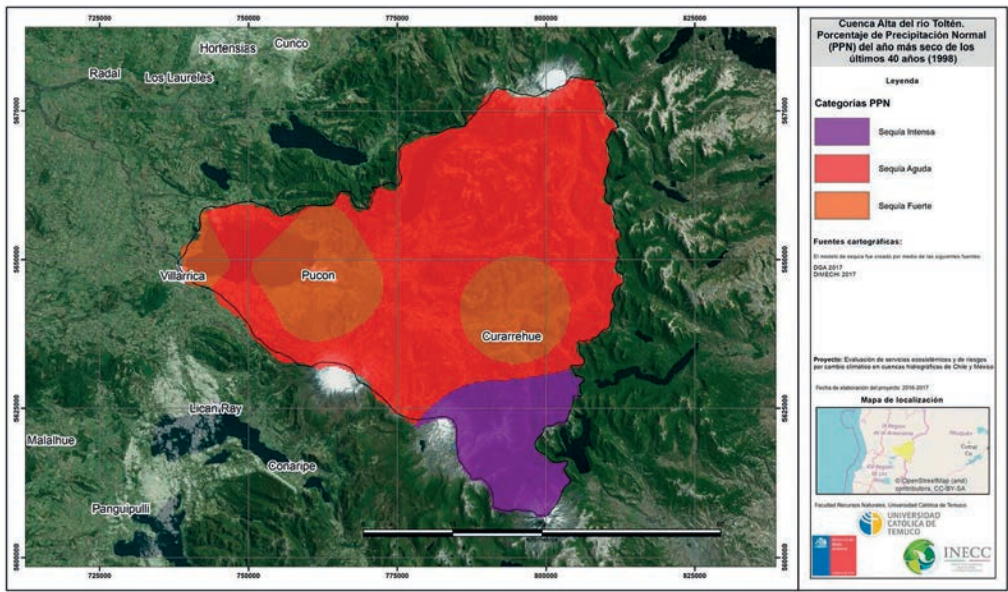


Figura 2.12. Porcentaje de Precipitación Normal aplicado a 1998.

A wide-angle landscape photograph of Lake Villarrica in Chile. The foreground shows a rocky and vegetated shoreline with some litter. The middle ground is dominated by the calm, blue waters of the lake. In the background, a range of mountains is visible, with a prominent, snow-capped volcano (Cerro Villarrica) on the right side. The sky is filled with soft, white clouds against a blue backdrop.

## 2. CUENCA DEL LAGO DE VILLARRICA, CHILE

### 2.4. IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

Entendiendo la vulnerabilidad en función de los factores capacidad adaptativa, exposición y sensibilidad (IPCC, 2007), este estudio, determinó la vulnerabilidad actual para la cuenca del lago Villarrica, en función de la resiliencia al cambio climático por parte de los servicios ecosistémicos.

## 2.4. IDENTIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

### 2.4.1. METODOLOGÍA

Para esto, se definió un total de 19 variables, las que se distribuyeron de la siguiente forma: 2 para exposición, 8 para sensibilidad y 9 para capacidad adaptativa. El factor exposición fue tratado como el tipo y grado en que un sistema está expuesto a variaciones climáticas importantes (IPCC 2007). De acuerdo a lo anterior y según las bases cartográficas disponibles para el área de estudio, así como un estudio realizado por el Ministerio del Medio Ambiente sobre escenarios climáticos regionales (Santibañez, 2016), se decidió incluir la temperatura extrema y la precipitaciones actual de los modelos propuestos por Hijmans et al. (2005) para el área de estudio.





El factor sensibilidad, fue considerado como el nivel en que un sistema resulta afectado de forma negativa o positiva por estímulos relacionados con el clima (IPCC 2007). Las variables consideradas en este caso fueron: La vocación de uso de suelo que permite evaluar la resiliencia de estos y su grado de sensibilidad al cambio, el potencial de erosión como un proxy desfavorable a los distintos tipos de iniciativas que deriven como por ejemplo a la actividad agrícola, la existencia de áreas protegidas públicas y privadas como zonas que afectan positivamente la capacidad de resiliencia por la existencia de bosques de protección, los sectores de inundación como proxy desfavorable a diversos tipos de actividades o procesos humanos, la población total por distrito censal como referente de la presión humana sobre los SE, las presencia de comunidades indígenas como un elemento que aporta favorablemente la resiliencia debido a la connotación cultural y como zonas que reciben recursos para la protección del patrimonio, y el riesgo de sequía como proxy desfavorable para la vegetación.

Finalmente, el factor capacidad adaptativa, fue tratado como la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad climática y los cambios extremos) a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas (IPCC 2007). Se consideraron variables de capital financiero relacionadas a aportes económicos en el territorio. Las variables utilizadas fueron: canales de regadío, red vial, electrificación, educación, salud, proyectos de agua potable rural, proyectos bajo el marco de la Ley N° 18.450 (fomento de la inversión privada en obras de riego y drenaje), existencia de bocatomas, proyectos bajo el marco de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) y proyectos de inversión del Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP).

Se definió una resolución espacial de 50 metros, lo cual generó una grilla que contuvo la sumatoria total de los valores asignados. Posteriormente, la información raster producida se analizó por medio de un modelo geoestadístico, el cual evidenció un variograma de tipo esférico con características anisotrópicas en sentido latitudinal que permitió interpolar los niveles de vulnerabilidad, mejorando la precisión de las áreas definidas por el modelo espacial. Similares resultados obtuvo Binita et al. (2015) para el estudio de problemáticas similares en Georgia, USA. La técnica utilizada considera la distancia o la dirección entre los puntos con una alta correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie [2]. El resultado final fue reclasificado en cinco categorías, para facilitar la interpretación.

Donde:

$$Z(S_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z(S_i)$$

-   $Z(S_i)$  = el valor medido en la ubicación  $i$ ;
-   $\lambda_i$  = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación  $i$ ;
-   $S_0$  = la ubicación de la predicción;
-   $N$  = la cantidad de valores medidos.

### 2.4.2 RESULTADOS

La determinación de la vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos (SE) al cambio climático fue obtenida en base al modelo conceptual detallado en la Figura 2.13. Las variables utilizadas para la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa se indican en la figura.



Figura 2.13. Modelo conceptual para la estimación de la vulnerabilidad al cambio climático.

Asimismo, el modelo de interpolación, basado en el valor de vulnerabilidad estimado, permitió el ajuste de un variograma de tipo exponencial (Figura 2.14 a) con  $r^2 = 0.989$ . El modelo de interpolación resultó ser anisotrópico evidenciando un patrón de distribución latitudinal en dirección norte-sur ( $14^\circ$ ) (Figura 2.14 b) abarcando un rango de precisión del orden de los 52,6 mil metros.

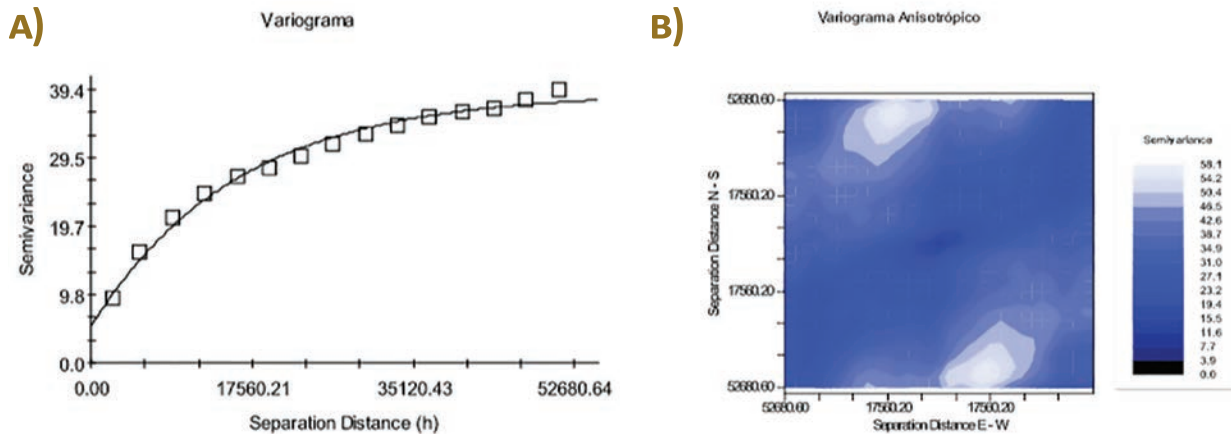


Figura 2.14. Ajuste del variograma empírico y experimental para la variable vulnerabilidad. En a) variograma; b) análisis anisotrópico.

La representación espacial de la vulnerabilidad (Figura 2.15), obtenida en base al modelo conceptual, mostró que un 53% de la cuenca bajo estudio se encuentra en una condición de alta y muy alta vulnerabilidad ante eventos relacionados al cambio climático, con un nivel medio que alcanza el 16% aproximadamente. Asimismo, la Figura 2.16, muestra la representación cartográfica de los estresores (Figura 2.16 a), sensibilidad (Figura 2.16 b), y capacidad adaptativa (Figura 2.16 c).

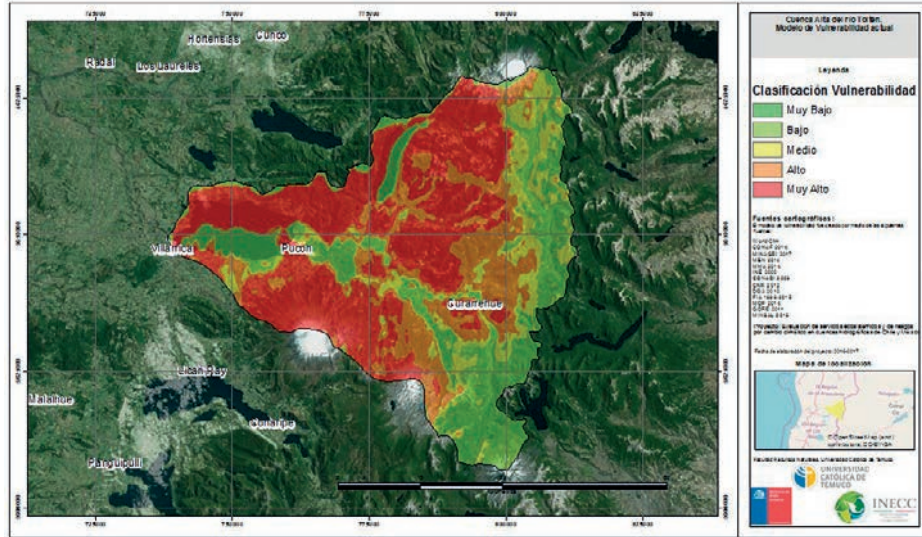


Figura 2.15. Clasificación espacial de la vulnerabilidad actual en la cuenca alta del lago Villarrica.

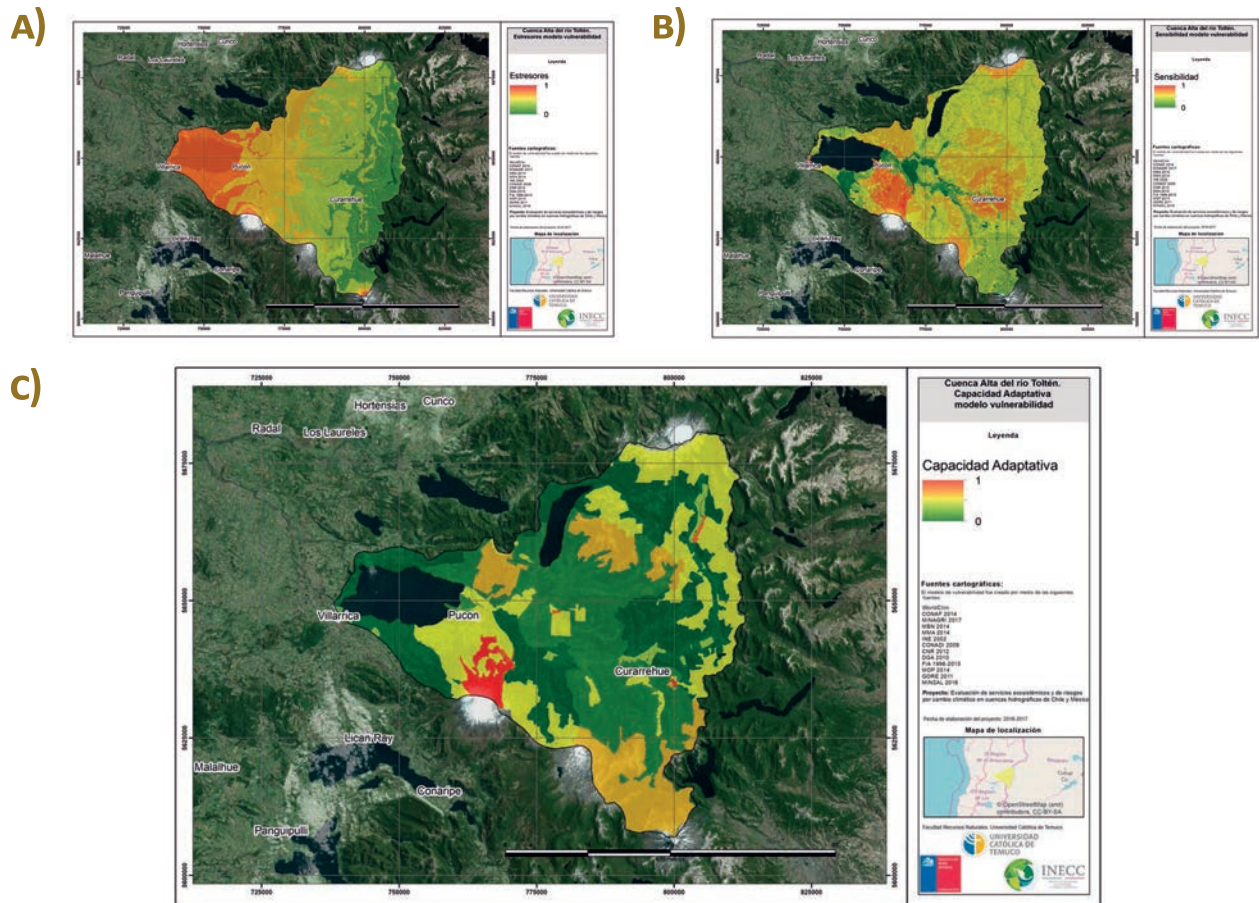


Figura 2.16. Expresiones cartográficas del modelo conceptual de vulnerabilidad actual. En a) estresores; b) sensibilidad; c) capacidad adaptativa.

A woman wearing a red jacket and a dark beanie stands in a rustic wooden cabin, pointing towards a map on the wall. She is addressing a group of people seated in the foreground. The cabin has wooden walls and a doorway in the background. The scene is lit with warm, indoor lighting.

## 2. CUENCA DEL LAGO DE VILLARRICA, CHILE

### 2.5. IDENTIFICACIÓN Y ESPACIALIZACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.

Para la identificación de medidas de adaptación local al cambio climático, se utilizó una metodología de tipo cualitativa a través de la participación de los actores presentes en la cuenca del Lago Villarrica (Taylor & Bogdan, 1987).

## 2.5. IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN LOCAL AL CAMBIO CLIMÁTICO.

### 2.5.1. METODOLOGÍA

Se realizaron talleres de mapeo participativo que recogieron las opiniones, observaciones y aportes de los participantes. Para la preparación de los talleres adicionalmente se utilizó, como apoyo metodológico un listado de elementos claves asociados a los sectores más afectados por el cambio climático en cada comuna, así como la revisión de los planes sectoriales de adaptación al cambio climático, como el sector Silvoagropecuario, Biodiversidad, Salud, etc.

### 2.5.2 RESULTADOS

Una síntesis de las principales problemáticas asociadas al cambio climático que fueron identificadas en los talleres locales se muestra en la Figura 2.17 a. Estas dicen relación fundamentalmente con los efectos que provocan los eventos extremos como la sequía e inundaciones, sobre los recursos naturales e hídricos en la cuenca, efectos sobre la agricultura y la falta de gobernanza en materia de recursos hídricos.

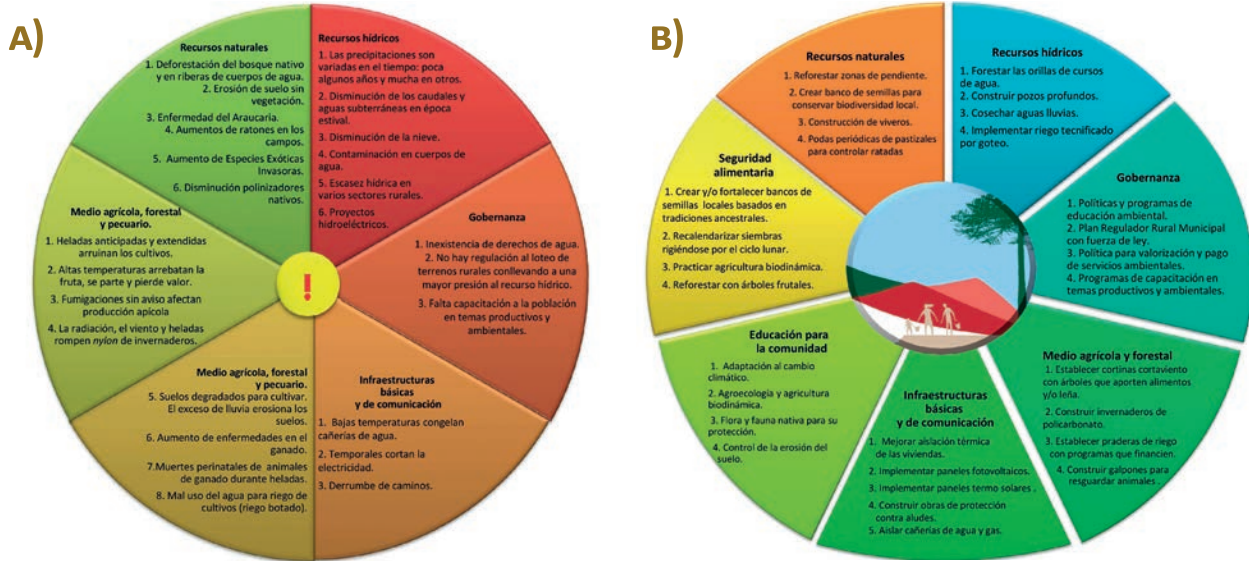



Figura 2.17. a) Problemáticas vinculadas al cambio climático. b) Medidas de adaptación al Cambio Climático en sectores rurales de la Cuenca del Lago Villarrica. Fuente. Elaboración propia

Frente a las problemáticas planteadas, se sistematizó las principales medidas de adaptación al cambio climático identificadas por los actores locales en los talleres, las cuales se muestra en la figura 2.17 b. Las principales medidas, tuvieron relación con la afectación del medio natural, enfocándose en la protección de los servicios ecosistémicos vinculados con el agua y el bosque, tales como la reforestación de bosque nativo, la protección de cursos de agua, reutilización y ahorro del recurso hídrico, enfatizando en la acumulación en mini embalses, captación de agua, construcción y mejoramiento de pozos profundos en particular las comunas de Curarrehue y Pucón. Se evidenció requerimientos de mejora tecnológica en materia de riego, mejoramiento de invernaderos capaces de adaptarse a las condiciones frente a eventos climáticos extremos como heladas o sequía, asimismo, se enfatizó en el fomento y la recuperación de semillas mejor adaptadas a las condiciones climáticas.





## 3. CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, MÉXICO

### 3.1. SERVICIO DE SOPORTE DE LA BIODIVERSIDAD

Generar una línea base actualizada de la relación del cambio en el uso de suelo y la variabilidad climática en la cuenca y el impacto en el servicio ecosistémico de mantenimiento de la biodiversidad, en particular de las especies de aves asociadas a los bosques.

### 3.1. SERVICIO DE SOPORTE DE LA BIODIVERSIDAD

#### 3.1.1 METODOLOGÍA

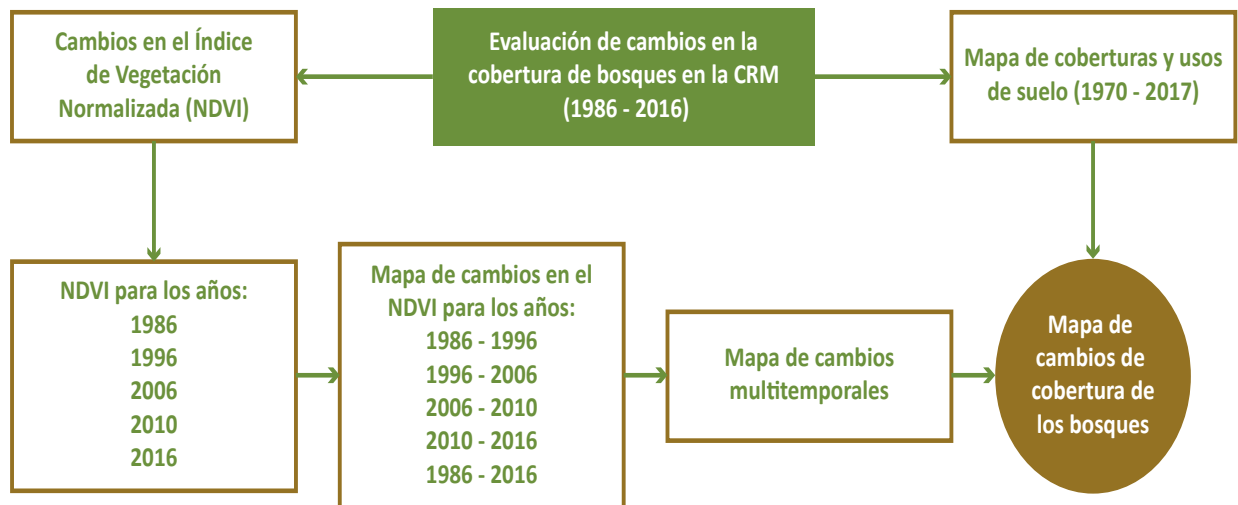
El sitio de estudio para la evaluación de los bosques como soporte de la biodiversidad (aves) abarcó tres delegaciones de la Cuenca del Río Magdalena (CRM): Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras. La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) proporcionó una base de datos que contenía registros de aves del periodo 1946-2016. Se usó el listado de las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves (AICAS) para la CRM para identificar a las especies residentes. Las especies residentes son las que dependen de manera directa de los hábitats de la microcuenca por lo que seleccionamos a este grupo como el grupo objetivo.

Dentro del portal “EncicloVida” <http://bios.conabio.gob.mx/> se buscaron las especies residentes identificadas para obtener la ficha. De las fichas se obtuvo información de: a) hábitat primario; correlación con la degradación o el incremento en el mismo b) estrategia trófica principal; importancia y papel de las especies de aves dentro de la microcuenca; c) época reproductiva (inicio y final); d) tendencia poblacional; se analizaron de manera detallada las ocho especies de importancia reportadas por Cantoral (2009) así como de todas las especies reportadas como residentes por AICAS y se graficó contra el tiempo para ver las fluctuaciones de presencia en el periodo de 1946-2016.

#### *Evaluación de cambios de cobertura forestal en la cuenca*

La fuente primaria de análisis de datos para este estudio estuvo compuesta por cinco series de imágenes satelitales secuenciales (LANDSAT, SPOT y SENTINEL) de la CRM; se manejó como indicador principal el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI). Posteriormente se realizó un mapa de polígonos de cambio de vegetación, a partir de interpretación visual y digitalización en pantalla con referencia a imágenes de 1970 y 2008 con el objetivo de identificar las coberturas más perturbadas en el periodo 1970-2017.

La metodología diseñada fue la siguiente:



### 3.1.2. RESULTADOS

#### Soporte de la biodiversidad (aves)

Se recibieron 14,044 registros de avistamientos de aves anidadas en 234 especies para las tres delegaciones en el periodo de 1946-2016. Dentro de los registros de AICAS el 58% de las especies son residentes, seguido por las residentes de invierno, y las demás categorías que sumadas son el 15% de las cuales son migratorias altitudinales, transitorias, ocasionales/accidentales y otras en las que no se tiene información. Se encontró que las aves residentes se distribuyen dentro de 11 diferentes hábitats primarios, todos estos reportados en las fichas de "EncicloVida". El 50.84% de las especies viven en los bosques de la microcuenca y se dispersan en matorral con 19.49%, pastizal 8.47% y zonas riparias 2.54%. La distribución de los hábitats se puede observar claramente en la Figura 3.1. Se encontraron nueve tipos de estrategias alimentarias dentro de las especies residentes, siendo la insectívora la principal estrategia trófica, seguida por los omnívoros (ver Figura 3.2).

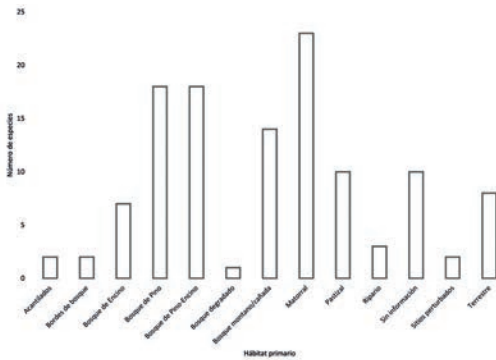


Figura 3.1. Número de especies de aves residentes distribuidas los hábitats primarios del sitio de estudio.

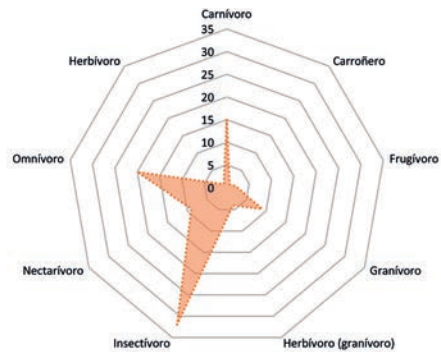
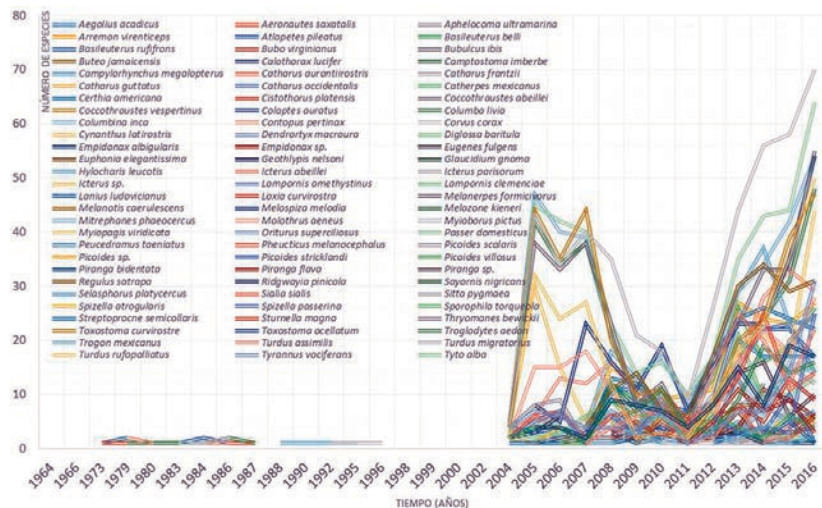


Figura 3.2. Estrategias alimentarias de las especies residentes dentro del sitio de estudio.

Se encontró que el 43.02% de las poblaciones de las especies residentes se encuentran estables hasta el 2016. El 31.40% está decreciendo y el 25.58% está creciendo. Se observó un decremento en el número de registros de las ocho especies reportadas por Cantoral (2009) en el año 2011 por lo que se graficó el total de especies residentes en relación al tiempo para ver si se encontraba un patrón similar. De las 118 especies reportadas por AICAS como residentes solo 84 tuvieron registro desde 1964 a 2016. Se encontró el mismo patrón de disminución que en las primeras especies analizadas después de analizada (ver Figura 3.3). Se encontró que las aves residentes de la zona de estudio se reproducen principalmente en los meses de marzo, abril y mayo (primavera). Lo que coincide con los meses donde se presenta la temperatura máxima promedio mensual reportada por las dos estaciones climatológicas analizadas en el capítulo de eventos climáticos extremos.

Figura 3.3. Número de avistamientos de 84 especies residentes de la zona de estudio desde 1964 a 2016.



### Evaluación de cambios de cobertura forestal

El análisis de cambios de NDVI presenta un comportamiento ascendente en la pérdida de cobertura. Para corroborar los resultados del NDVI se digitalizó en pantalla la vegetación y usos de suelo, para el año 2017, los resultados muestran que el 49% de la cobertura para las tres delegaciones es de uso urbano, seguido de bosque de pino con 22%, bosque de oyamel con 16% y pastizal con 6% ver Figura 3.4 (arriba).

Para la CRM las categorías con mayor superficie son: bosque de pino con 31%, bosque de oyamel con 23%, bosque de pino-oyamel con 23% y pastizal con 11%. Los resultados presentan que el 31% de la superficie de las tres delegaciones presentaron algún cambio en este periodo. Los cambios presentados en las tres delegaciones fueron principalmente en tres tipos de coberturas, en zona urbana, pastizales y bosque de pino. El 37 % de los cambios fueron debido a la ampliación de la mancha urbana, el 20% pérdida de pastizales y el 17% pérdida de bosque de pino. Para la CRM en el periodo 2008-2017 se registró perturbación en la cobertura de pino y pino-oyamel sumando un total de 300 ha, de las 2,900 de la cuenca. En el análisis se encontró que los cambios en la CRM fueron de densidad, no de cambio de uso de suelo, las coberturas de pastizales presentaron pérdida en superficie y en las zonas mixtas de bosque de pino-pastizal la densidad de bosque ganó superficie. Al mismo tiempo, hay zonas de reforestación que representaron ganancia en la superficie de bosque de pino.

Los datos de aves registradas en el periodo 1946-2016 presentan mayor abundancia de especies en las coberturas de bosque de pino-encino (1,500 registros), matorral (1,422 registros), bosque de cañada (1,000 registros), bosque de pino (660 registros) y terrestre-urbano (997 registros) ver Figura 3.4 (abajo).

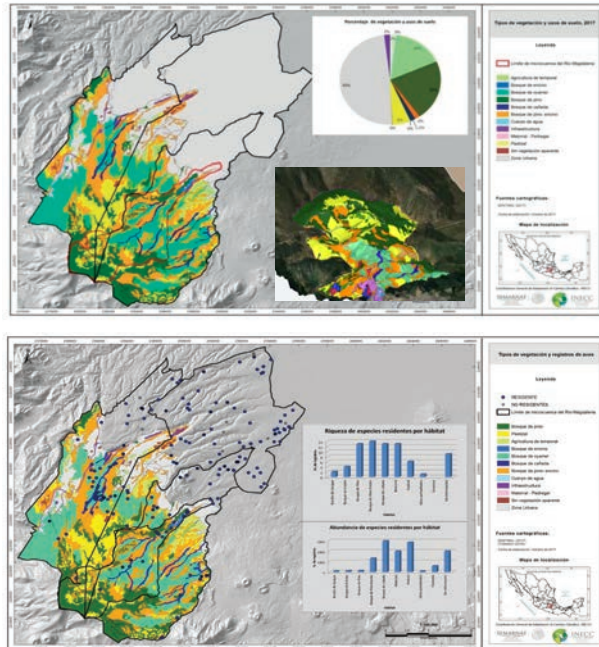


Figura 3.4. Mapa de vegetación y usos de suelo para las tres delegaciones, 2017 y mapa de vegetación y registro de aves.

Este estudio aporta de manera clara evidencias de los efectos de cambio climático sobre la distribución de aves; así como al análisis de cobertura y distribución de la vegetación que proporciona información relevante del servicio ecosistémico de soporte de la biodiversidad.



## 3. CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, MÉXICO

### 3.2. SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PROVISIÓN DE AGUA

Evaluar el servicio de provisión de agua para abastecimiento público urbano, para apoyar la planeación territorial mediante la determinación de acciones y sitios prioritarios que promuevan la conservación de este servicio.

## 3.2. SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PROVISIÓN DE AGUA

### 3.2.1 METODOLOGÍA

Para esta sección se utilizó el modelo WEAP, una herramienta computacional de acceso libre que considera por un lado las condiciones de demanda de agua y por otro las de oferta.

La construcción del modelo WEAP, contempló las etapas que a continuación se describen:

1. **Definición del estudio:** En esta etapa se estableció el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
2. **Búsqueda de información:** En esta etapa se realizó una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido.
3. **Desarrollo del modelo:** En esta etapa se construyó el esquema, la introducción de datos y se realizaron corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.



**Generación de esquema.** Consistió en dibujar el río principal y los centros de demanda.



**Conectar oferta y demanda.** En este caso se conectaron las plantas potabilizadoras a la corriente del río.



**Ingreso de datos.** Los datos se cargaron al modelo de forma manual.

4. **Calibración:** Se utilizaron los datos de registros históricos del caudal.
5. **Uso del modelo, generación de escenarios:** En este caso se consideró el impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso, para lo cual se utilizaron las proyecciones de precipitación para los modelos MPI-ESM-LR (Alemania), GFDL-CM3 (Estados Unidos), HADGEM2-ES (Reino Unido), CNRM (Francia), para el horizonte cercano 2015-2039 y los RCP 4.5 y 8.5, a excepción del modelo CNRM, para el cual solo se evaluó el RCP 8.5.

### 3.2.2 RESULTADOS

Para el desarrollo de esta sección se hizo una revisión sobre los datos hidrométricos, climatológicos, la demanda de agua para la determinación de la oferta y demanda del recurso hídrico para el abastecimiento. Se sabe que la CRM ha sido objeto de diversos estudios entre ellos la determinación del balance hídrico, sin embargo, carece de información hidrométrica que sirva como base para este tipo de determinaciones.

Para la modelación del recurso hídrico este trabajo, se hicieron las siguientes consideraciones:

Dada la carencia de información con suficiente registro de datos, para la determinación mensual del escurrimiento, se tomó como escurrimiento base el reportado por Montes (2013), el cual es el resultado de datos medidos en campo en 2010 y 2011, así como de estimaciones con datos de precipitación histórica. Además

estos datos se reportan en dos tramos, y de forma mensual que es como se requiere para la modelación. Se consideraron como sitios de demanda la planta potabilizadora “Río Magdalena” localizada en el Primer Dinamo y la nueva planta ubicada en la Cañada (200 L/s), esta última hasta donde se tiene conocimiento no ha iniciado operaciones y tiene una capacidad de diseño de 250 L/s (Grupo de Trabajo Multidisciplinario PUEC-UNAM, 2008).

Para la consideración del impacto del cambio climático sobre el servicio de provisión de agua, se consideraron escenarios de cambio climático mencionados en la metodología, para los cuales la climatología base utilizada es la de 1950 a 2000 que fue desarrollada en “very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas” (Hijmans et al., 2005) estos cuentan con una resolución espacial de aproximadamente 1 km por 1 km (30” x 30”). La selección de estos escenarios, se debe a que son los que representan el mayor intervalo de variación de la precipitación y evaluándolos se están considerando las demás posibilidades. La representación de la variación de la precipitación para la cuenca, se presenta en la Figura 3.5.

Bajo estas consideraciones, la modelación mostró que para ninguno de los escenarios evaluados se podría presentar demanda insatisfecha, ya que tanto para el escenario de referencia como para los escenarios con cambio climático la cobertura se garantizaría, la línea verde de la Figura 3.6 indica que la cobertura de la demanda es del 100%. Es importante resaltar que estos resultados solo consideran la demanda de agua para potabilización sin considerar cambios en la mancha urbana, o cambios en la degradación del suelo de conservación, por lo que solo son válidos para los supuestos descritos anteriormente.

En trabajos reportados por el Instituto de Ingeniería-UNAM (2008) y Jujnosky (2006) se ha descrito la capacidad de la cuenca de retener agua precipitada y liberarla lentamente, de aquí la importancia de preservar y mantener la zona de conservación de la cuenca, ya que esto además de conservar el servicio de provisión de agua en este caso, las zonas altas amortiguan las crecidas en caso de presentarse lluvias importantes como lo menciona el Instituto de Ingeniería-UNAM (2008), esta acción también evitaría la pérdida de suelos por remoción en masa y erosión principalmente en la cuenca media.

Por otra parte en la cuenca media se desarrollan actividades culturales como la visualización de fauna, principalmente aves (Jujnosky, 2006), por lo que la conservación de la cuenca en este caso beneficia no solo el servicio de provisión, sino el de soporte de biodiversidad y el turismo.

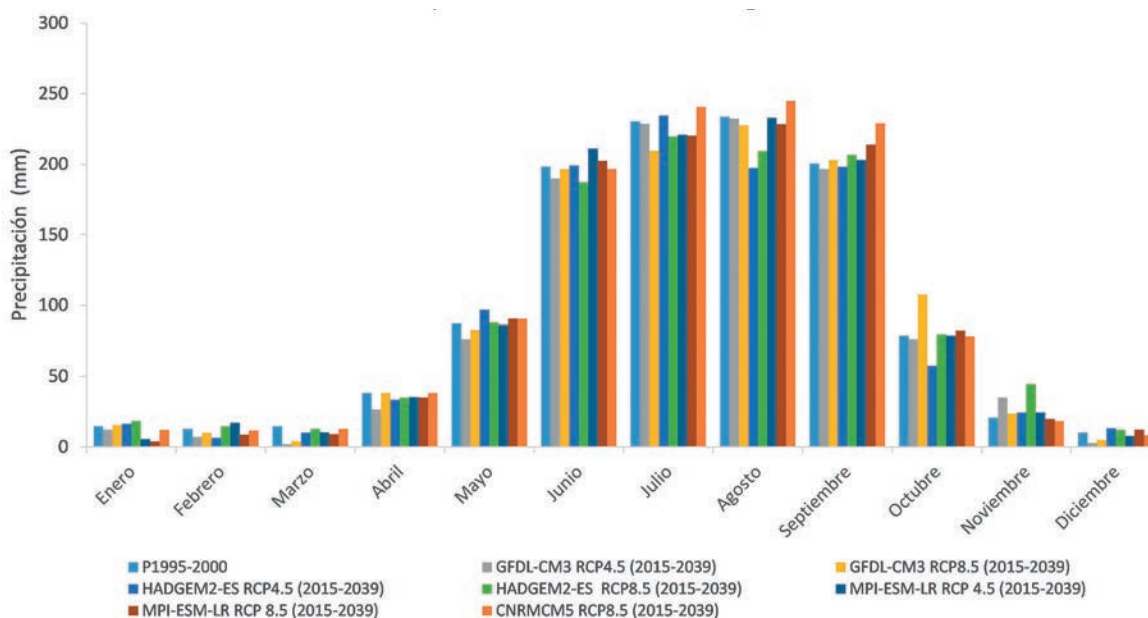
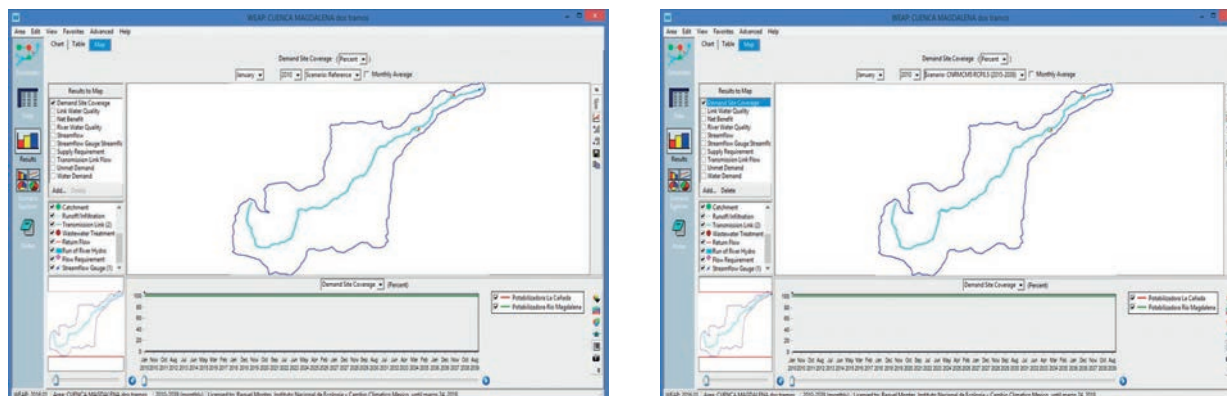


Figura 3.5. Precipitación en la Cuenca del Río Magdalena, histórica y proyectada.



**Figura 3.6.** Cobertura de la demanda modelada para el escenario de referencia y el escenario CNRMCM5 (2015-2039).

La determinación de la oferta y la demanda de agua en la cuenca es importante para la ciudad de México tanto para la condición actual como para los posibles impactos derivados del cambio climático, con el fin de apoyar la planeación territorial.





## 3. CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, MÉXICO








### 3.3. VARIABILIDAD CLIMÁTICA (EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS)

Detectar posibles cambios en los eventos climáticos extremos de temperatura y precipitación en la cuenca (urbana y boscosa) que se podrían relacionar con eventos como inundaciones, deslizamientos y temperaturas extremas.

### 3.3. VARIABILIDAD CLIMÁTICA (EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS)

#### 3.3.1 METODOLOGÍA

La información climática adquiere un alto valor socioeconómico en aquellas partes del mundo donde se le considera como un elemento para la toma de decisiones. La herramienta con la que se llevó a cabo el análisis de los eventos climáticos extremos es muy útil para comprender parte del clima a nivel global y regional, caracterizar regiones hidrológicas, delimitación de zonas de riesgo hidrometeorológico y planeación agrícola, entre otras aplicaciones. Para poder realizar el análisis de los eventos climáticos extremos en la CRM se siguió la siguiente metodología:

-  **Selección de estaciones climatológicas:** Se revisó la disponibilidad de las estaciones climatológicas dentro del sitio de estudio.
-  **Descarga de datos de Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin) y Precipitación (Pcp)** de las estaciones seleccionadas. Las series de datos se descargaron de fuentes oficiales y confiables. Las series de datos diarias utilizadas se descargaron de la página de CLICOM-CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx/>). Por otra parte, del sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, <http://smn.cna.gob.mx/es/climatología/información-climatologica>) se obtuvieron las normales climatológicas 1971-2000 de Tmax, Tmin y Pcp.
-  **Control de calidad de datos.** Se realizó una revisión de las series de datos a utilizar y detectar posibles errores, en este estudio la revisión se hizo en tres fases:
  1. Inspección ocular de la gráfica de las series de datos
  2. Cálculo del porcentaje de registros diarios
  3. Revisión de la calidad numérica de los datos, utilizando el software RClindex1.0 (<http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>)
-  **Homogeneización de series de datos.** Se minimiza el impacto de sesgos artificiales que puedan afectar las series de datos producto de discontinuidades en las mismas. Se utilizó el programa RHtestsV4 (<http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>) para la homogeneización de las series de temperatura.
-  **Descripción de climatología.** Con las normales climatológicas de un periodo de referencia base (en este caso 1971-2000) se pueden indicar las variaciones del ciclo anual (temperatura y precipitación) en el lugar de estudio.
-  **Cálculo y selección de índices de eventos climáticos extremos.** Se utilizaron los índices del grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) para caracterizar los eventos climáticos extremos. De los cuales, para este estudio, se seleccionaron precipitación máxima en 1 día, precipitación máxima en 5 días consecutivos, precipitación total anual y días de verano con Tmax >25°C y 30°C, porque su representación se consideró relevante para este estudio.
-  **Ajuste de tendencias climáticas.** Se realizó para detectar cambios en las series promedio anuales de temperatura y precipitación, así como en las series de eventos climáticos extremos. El ajuste se hizo con un modelo de regresión lineal cuyos supuestos estadísticos se verificaron con pruebas de especificación, las cuales se realizan considerando las pruebas de hipótesis a un nivel de confianza del 95%.

### 3.3.2 RESULTADOS

Para detectar los posibles cambios observados en los eventos climáticos extremos en la CRM, se realizó un análisis de tendencias, de esta manera se pueden dar un panorama de cómo están cambiado este tipo de eventos que pueden mostrar relación con los eventos de inundaciones, deslaves y altas temperaturas. Para dicho análisis se seleccionaron los dos mejores sitios y los más cercanos a la CRM, las estaciones meteorológicas con claves 9020 (*Desviación Alta al Pedregal*) en la Delegación Tlalpan de la Ciudad de México y la estación 15045 (*La Marquesa*) en el Estado de México. La climatología en ambas estaciones es similar, aunque los rangos de los valores tienen diferencias, la zona de la estación 15045 es más fría ya que se localiza en la zona conurbada (boscosa) de la cuenca, mientras que la estación 9020 se ubica en la zona urbana de la Ciudad de México (CDMX) y por tanto sus temperaturas son más cálidas. Las series de datos diarias de temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin) y precipitación (Pcp) fueron revisadas con un procedimiento sistemático de control de calidad, así como de homogeneización (ver Figura 3.7).



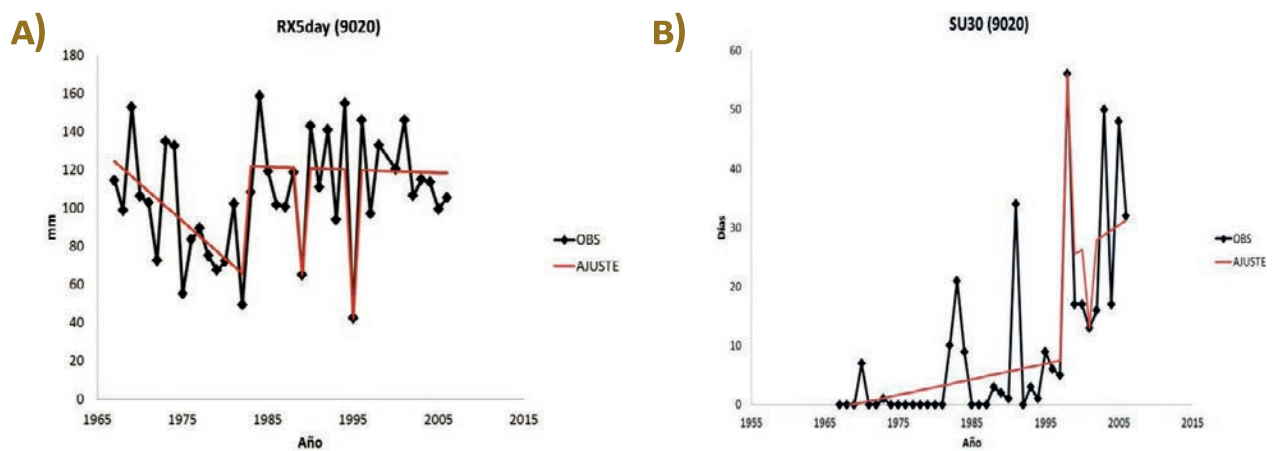
Figura 3.7. Estaciones climatológicas.

El ajuste de tendencias a las series de datos se realizó con un modelo de regresión lineal y se validó con pruebas de especificación en los residuales. La interpretación se realizó considerando el valor de la pendiente del modelo de regresión lineal y su significancia, si la tasa de cambio tenía un valor positivo significaba un incremento y si era negativo entonces era un decremento. Además si la probabilidad ( $p$ ) resultaba menor a 0.05 había un cambio (tendencia significativa) y si era mayor a 0.05 no existía cambio (tendencia no significativa).

Para Tmax promedio anual, se observó un cambio de incremento en la estación 9020 lo que significa que las temperaturas diurnas son más cálidas, al mismo tiempo la Tmin está disminuyendo (temperaturas nocturnas). Lo anterior posiblemente se deba a que la radiación de onda larga escapa mucho más rápido por la noche (cielos despejados) lo que propicia un mayor descenso de la temperatura, incluso se puede decir que el efecto de la isla de calor urbano puede no estar afectando en esta región cercana a la cuenca. En la estación 15045 de la zona conurbada de la cuenca, sólo se incrementó la Tmin, mientras que Tmax no cambió, esto puede deberse a que por el día hay un calentamiento y por las noches la radiación emitida de onda larga no está escapando, lo que contribuye a que haya temperaturas mínimas menos frías, posiblemente debido a una mayor cantidad de nubosidad. En ambas zonas, la precipitación total anual acumulada no presentó cambios, es decir se tuvieron tendencias no significativas.

Para caracterizar los eventos climáticos extremos se seleccionaron los índices RX1day (cantidad máxima de precipitación en 1 día), RX5day (cantidad máxima de precipitación en 5 días consecutivos), PRCPTOT (precipitación total anual), SU25 (días de verano  $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ ) y SU30 (días de verano  $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ ), de los 27 índices base definidos por el Equipo de Expertos en Índices y Detección de Cambio Climático (ETCCDI), ya que son de interés para la zona de estudio debido a los posibles impactos para la población y los ecosistemas. Estos índices se calcularon con ayuda del programa Rclimdex 1.0, el cual fue desarrollado para el cálculo de los mismos por Xuebin Zhang y Yang Feng del Climate Research Division (<http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>).

En general, para los eventos climáticos extremos de precipitación no se detectaron cambios, únicamente en el índice RX5day de la estación 9020 se tuvo una tendencia significativa, la cual fue de decremento (ver Figura 3.8 a). Lo anterior significa que la cantidad de precipitación máxima que se puede acumular en 5 días consecutivos disminuyó, particularmente en la zona urbana de la cuenca. Aunque los resultados en su mayoría no mostraron cambios en los índices, no significa que no haya eventos de precipitación extrema, pueden ocurrir eventos muy extremos, los cuales pueden tener impactos negativos en la zona de estudio. Es necesario realizar un análisis más específico, por meses o temporadas para poder observar si hay cambios en estos eventos.



**Figura 3.8.** Gráficas de ajuste de tendencia en la estación 9020 (CDMX) para los índices de a) cantidad máxima de precipitación en 5 días consecutivos (RX5day), b) Días de verano –  $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$  (SU30). La línea roja representa el ajuste con el modelo de regresión lineal, en ambos casos se detectaron cambios de decremento e incremento, respectivamente.

Se destaca que por su climatología, en la estación 15045 no hubo ocurrencia de temperaturas por encima de  $30^{\circ}\text{C}$ , ya que se localiza en una zona templada. En este mismo sentido, SU25 para esta estación no presentó cambios en la tendencia, aunque sobresalieron eventos en 1983 y 1998, que corresponden a años de El Niño, donde se registraron temperaturas con valores altos. Lo contrario ocurrió en la estación 9020, aquí los SU25 y SU30 están aumentando, es decir, hubo una mayor ocurrencia de eventos cálidos extremos y por tanto de temperaturas más cálidas. En el caso de SU30 también ocurrió un cambio estructural notable, en 1998 hubo un incremento en el valor de la tasa de cambio (Figura 3.8 b). Por tanto a partir de 1997-1998 el incremento de días de verano ha sido mayor, sobre todo para aquellas temperaturas con un umbral mayor a  $25^{\circ}\text{C}$ , destacando que eventos sobresalientes ocurrieron en años de El Niño. La ocurrencia de temperaturas más cálidas puede tener impactos en la zona, por ejemplo pueden ser una causa de incendios forestales, como los ocurridos en el año de 1998 por las altas temperaturas; además de que representan un peligro para la salud de la población, porque pueden generar insolaciones, golpes de calor y otros efectos dañinos.

La detección de posibles cambios en los eventos climáticos extremos de temperatura y precipitación permitió conocer si estos están incrementando, disminuyendo o no están cambiando, al mismo tiempo pueden ser una herramienta útil como un proxy para evaluaciones de riesgo.

## 4. LECCIONES APRENDIDAS

---

En esta sección se presentan las lecciones aprendidas durante la ejecución del proyecto, como una forma de generar una base de conocimiento, detectar oportunidades de mejora y formular recomendaciones para el diseño de proyectos futuros tanto para los participantes de este proyecto como para quienes tengan en sus manos el presente documento.

Durante esta experiencia, la comunicación e interacción entre las instituciones participantes, permitió la planificación, la toma de decisiones, la gestión de recursos y la resolución de diferencias, lo que se reflejó en los productos generados. Se llevó a cabo una ejecución eficiente del uso de los recursos financieros, de acuerdo a lo establecido en el programa de trabajo, aún más se utilizaron recursos económicos y profesionales de cada institución participante, cuando así fue posible, sin detrimento de la calidad de los productos.

Un aprendizaje importante fue la necesidad de contar con información actualizada para los análisis, ya que si bien se aprovechó y procesó el conocimiento existente, fue necesario generar nuevos insumos para las dos cuencas. Es importante contar y generar información de calidad que pueda ser transformada en conocimientos e instrumentos que enriquezcan este tipo de experiencias, ya que es clave en el análisis de los impactos del cambio climático y la vulnerabilidad.






Proyectos como este, tienen que asegurar el involucramiento de las comunidades locales y de las instituciones con presencia o influencia en el territorio, particularmente en la Cuenca del Río Magdalena, se debe mejorar el análisis a través de alianzas con otras instituciones con las que se tengan intereses en común, así como fomentar una mayor coordinación entre los principales actores involucrados.

Dada la amplia superficie de la subcuenca del Lago Villarrica en relación a la Cuenca del Río Magdalena (280,000 km<sup>2</sup> versus 2,981 km<sup>2</sup>), se debe destinar una mayor cantidad de tiempo y espacios para el intercambio de información con la comunidad, a fin de poder recabar los antecedentes del territorio, no obstante, el intercambio de metodologías para la determinación de la vulnerabilidad y servicios ecosistémicos, consideramos que si resultó aplicable en ambas cuencas.



Una fuente importante de información que se puede aprovechar para evaluar el cumplimiento de los objetivos planteados, es la documentación y sistematización de las experiencias y conocimientos de los funcionarios involucrados intercambiaron.




## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CUENCA DEL LAGO DE VILLARRICA, CHILE





-  **La cuenca del lago Villarrica**, mostró que los servicios ecosistémicos se encuentran en una condición desfavorable ante los eventos asociados al cambio climático. En este contexto, el diseñar e implementar un programa de adaptación al cambio climático resulta fundamental. En efecto los sectores de vulnerabilidad más baja alcanzaron un 31% de la superficie de la cuenca, la cual corresponde, en su mayoría, a bosques nativo bajo algún grado de conservación y/o protección.
-  **Resultó fundamental el trabajo con actores locales**, con los cuales fue posible evidenciar las principales problemáticas referidas a cambio climático, destacando aquellas que dicen relación con los efectos que provocan los eventos extremos, como: sequía e inundaciones, sobre los recursos naturales, actividad silvoagropecuaria y gobernanza en materia de recursos hídricos.
-  **Las principales medidas de adaptación identificadas en los talleres locales**, fueron concordantes en su mayoría con las medidas que se encuentran definidas en los planes sectoriales de adaptación chilenos, y que tienen relación con la afectación del medio natural, principalmente aquellos relacionados a la protección de los servicios ecosistémicos relacionados al agua y bosque nativo, entre ellos cabe señalar: reforestación de bosque nativo, protección de cursos de agua, reutilización y ahorro del recurso hídrico (enfaticando en la acumulación en mini embalses, captación de agua, construcción y mejoramiento de pozos profundos) en particular para las comunas de Curarrehue y Pucón.
-  **Las aproximaciones sobre vulnerabilidad al cambio climático obtenidas de este estudio**, consideraron como variables relevantes para la modelación los servicios ecosistémicos identificados en el proceso de consulta ciudadana, no obstante, para futuras estimaciones se recomienda realizar un análisis detallado de otras fuentes de información aquí no consideradas.
-  **Este proyecto**, levantó las medidas de adaptación locales que fueron identificadas como prioritarias en parte de los territorios. Sin embargo, esta información puede servir de insumo para la elaboración de proyectos pilotos individuales o comunitarios, donde los municipios pueden coordinar su elaboración y presentación a fondos comunales, regionales o internacionales.

### CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, MÉXICO

-  **En la actualidad**, los estudios sobre la distribución de aves proporcionan ejemplos claros y evidentes de los efectos del cambio climático. El análisis de cobertura y distribución de aves mostró una correlación con el nivel de conservación donde la mayor abundancia se presentó en los rangos de pendiente media (15° - 30°) y alta (>45°) y bosques. Se encontró una relación directa entre pérdida de cobertura de pastizales de alta montaña en el periodo 2008-2017 y una disminución de los registros de aves en hábitat de pastizal en el periodo 2005-2016.
-  **La modelación hidrológica** mostró que la demanda de agua para las plantas potabilizadoras de la cuenca estaría cubierta tanto para los escenarios de referencia y de cambio climático, tomando en cuenta que las condiciones sociodemográficas y de degradación permanecen estables, sin embargo es importante mantener conservada la cuenca alta, donde se genera el servicio de provisión de agua.

-  **Al caracterizar los eventos climáticos extremos con índices**, únicamente se detectaron cambios en la cantidad máxima de precipitación en 1 día de la estación Desviación Alta al Pedregal (9020), donde se tuvo una tendencia significativa de decremento, es decir puede estar disminuyendo, particularmente en la zona urbana de la cuenca.
-  **Para el caso de los índices relacionados con temperatura**, se encontró que en la estación climática La Marquesa (15045) no hubo ocurrencia de temperaturas por encima de 30°C, y no se presentaron cambios en las tendencias del número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25°C. En cambio, para la estación 9020, se tuvo que el número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 25°C y el número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor a 30°C se están incrementando.
-  **La climatología de las estaciones analizadas para la cuenca resultó similar**, aunque los rangos de los valores muestran diferencias, como era de esperarse, debido a la localización de las estaciones; la zona de la estación 15045 es más fría que la estación 9020. Se detectaron algunos cambios significativos en los índices seleccionados, sin embargo no significa que no dejen de ocurrir eventos extremos (temperatura o precipitación), los cuales pueden tener impactos negativos en la zona de estudio.

## CONCLUSIONES GENERALES

-  **Los resultados de este proyecto aportan insumos para la generación de una línea base** de la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático que ayudará a detonar procesos de adaptación para salvaguardar los servicios ecosistémicos del territorio en México y Chile.
-  **El enfoque de cuenca resultó un acercamiento acertado para analizar los servicios ecosistémicos de provisión**, soporte y culturales en el contexto de cambio climático con el fin de generar y detonar acciones y medidas focalizadas a las particularidades de cada cuenca.
-  **Ambas cuencas mostraron ser áreas de relevancia ambiental y ecológica en cada país**, destacando la presencia de servicios ecosistémicos de provisión vinculados con el agua para consumo humano y para diversas actividades económicas, además de concentrar una alta diversidad de especies de flora y fauna, muchas de las cuales presentan problemas importantes de conservación. En este sentido, este estudio evidenció los potenciales impactos del cambio climático sobre los sistemas naturales y las posibles rutas de generación e implementación para la conservación de los mismos en un contexto de incertidumbre climática.
-  **Este proyecto permitió el intercambio de experiencias y metodologías para la identificación de servicios ecosistémicos**, vulnerabilidad y riesgos por cambio climático en cuencas hidrográficas de Chile y México. Dicho intercambio, propició el fortalecimiento de capacidades de los participantes de ambos países. Es importante destacar los alcances relacionados con el aprendizaje de las metodologías que permiten determinar la vulnerabilidad de los sistemas naturales ante eventos de cambio climático, y el reconocimiento de acciones y medidas posibles para detonar procesos de adaptación, las cuales en ambos casos se encuentran dentro de los lineamientos estratégicos y metas definidas en los Planes Nacionales de Adaptación al Cambio Climático de cada país.

*Esta es una muestra de las ventajas y beneficios de la colaboración conjunta entre países de Latinoamérica.*

## RECOMENDACIONES

- 🌿 **Se recomienda enriquecer los talleres participativos a fin de obtener mayor representatividad local**, lo que permitiría generar una mayor escala de análisis de la vulnerabilidad en el territorio, lo cual contribuiría a priorizar áreas y sectores críticos no identificados previamente, posibilitando la incorporación oportuna de estos aspectos en la planificación, basados en los lineamientos estratégicos del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2017-2022 del Ministerio del Medio Ambiente.
- 🌿 **Para el sitio de estudio mexicano se recomienda** profundizar en los estudios de niveles de tolerancia de los tipos de pastizales de alta montaña en la cuenca y de especies de bosque de pino, o incluso matorral, que van ganando terreno como efecto de cambios microclimáticos, así como la corroboración y seguimiento en campo. Así como la instalación de sitios de monitoreo permanentes de aves y de ser posible de otro tipo de fauna sensible o indicador, ya que este tipo de registro de aves migratorias es esencial para ver cambios o recambios en la biodiversidad y relacionarlo con variables climáticas.
- 🌿 **Dado que los hábitats que se encontraron dentro de las fichas “EncicloVida” son generales**, es recomendable su corroboración en campo y validación de información bibliográfica.
- 🌿 **Es necesario profundizar en los estudios de densidad de cobertura a alta resolución** en los bosques de pino mixto (pino-oyamel) y bosque mesófilo de montaña. De la misma manera entender la dinámica de cambios en los pastizales de alta montaña y pastizales-bosque de pino, identificar las posibles causas y cuáles son las categorías de vegetación involucradas por unidad de paisaje.
- 🌿 **Durante el desarrollo de este proyecto se coincidió con autores como el Instituto de Ingeniería-UNAM (2008)**, respecto a la necesidad de que en ambas cuencas se cuente con mayor cantidad de registros de variables como temperatura, humedad, evapotranspiración, precipitación, escurrimientos, entre otros, los cuales pueden enriquecer las posibilidades de probar y validar modelos hidrológicos, así como para la determinación de eventos extremos y en particular, en el caso de México, el monitoreo de la reproducción de las aves residentes de la cuenca.
- 🌿 **En el caso de Chile y México, es importante contar con un registro actualizado de los usuarios del recurso hídrico**, con la finalidad de contar con la información relacionada con la demanda de agua y lograr una mejor estimación de la oferta y demanda del servicio de provisión.
- 🌿 **Los resultados son obtenidos para el análisis de detección de cambios en temperatura y precipitación** se realizaron de manera anual, es decir un promedio de meses cálidos y fríos, por lo que sería necesario llevar a cabo un análisis por meses o por temporada.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguiló, A. (2000) Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente.
2. Aparicio, J. (1999): Fundamentos de Hidrología Superficial.
3. Binita, K.C. , Marshall S .J. and Johnson Gaither, C. (2015). Climate change vulnerability assessment in Georgia, Applied Geography, 62: 62-74
4. Cantoral E., Almeida, Lucía; Cifuentes, Joaquín; León, Livia;Martínez, Armando;Nieto, Adrián;Mendoza, Pedro;Villarruel, José L.;Aguilar, Verónica;Ávila, Víctor;Olguín, Héctor;Puebla, Fernando. (2009). La biodiversidad de una cuenca en la ciudad de México. Ciencias Núm. 94, abril-junio, 2009, pp. 28-33. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
5. CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, CL). (2003). Estudio Agrológico de la X Región. Tomos I y II. Santiago, Chile. CIREN. 412 p.
6. CONAF (2013). Catastro de vegetación nativa de Chile. <https://sit.conaf.cl/exp/ficha.php>
7. Pedraza, J. (1996). Geomorfología. Principios métodos y aplicaciones.
8. Esse C., Valdivia P., Encina-Montoya, F., Aguayo, C., Guerrero, M., Figueroa, D. (2014). Modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC) para el mapeo de servicios ecosistémicos en cuencas forestales del sur de Chile. Bosque (Valdivia) Vol.35 No.3 Valdivia 2014. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002014000300004>.
9. Ferrando, F. (1994). Métodos hidromorfométricos para determinar la erosividad en cuencas hidrográficas. Ingeniería hidráulica en México. 9 (3):5-14.
10. Fernandez, F. (1995). Manual de Climatología Aplicada. Clima, medio ambiente y planificación. Editorial Síntesis S. A., Madrid, España. 285 p.
11. Gómez-Orea, D. (1999). Evaluación de impacto ambiental. Un instrumento preventivo para la gestión ambiental. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. Editorial Agrícola Española. 701 p.
12. Grupo de Trabajo Multidisciplinario, PUEC-UNAM (2008). "Propuesta de diagnóstico integrado de la cuenca del río Magdalena." En Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del río Magdalena. SMA-GDF, UNAM, 2008.
13. Haines-Young, R. & Potschin, M. (2013) Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4. EEA Framework Contract No EEA/IEA/09/003. 34 p.
14. Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 25, 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
15. IPCC, (2007). Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
16. IHL, M. (1991). Cambios climáticos y patrones locales de los climas del norte chico usando imágenes NOAA/AVHRR. Tesis (Magíster en Geografía). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 227p.
17. NBAR, M. (2000). Episodes of flash floods and boulder transport in the Upper Jordan River. The Hydrology-Geomorphology Interface: Rainfall, Floods, Sedimentation, Land Use (Proceedings of the Jerusalem Conference, May 1999). IAHS Publ. no. 261
18. Instituto de Ingeniería-UNAM (2008). "Reporte de investigación para el Diagnóstico sectorial de la cuenca del río Magdalena: 3. Hidrología superficial e Infraestructura hidráulica." En Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del río Magdalena. SMA-GDF, UNAM, 2008.
19. Jujnosky, J. (2006). Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del Río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas. UNAM
20. Lawrence, L. (1999). Environmental Geology. Prentice Hall. P.p. 511 páginas.
21. Martínez, (1986): Antecedentes mapa comunal de riesgos. Ilustre Municipalidad de Peñaflo.
22. MMA (2016). Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. INFORME FINAL. Elaborado por Información para el Desarrollo Productivo Ltda. (INFODEP).
23. Montes, R. (2013). Metodología para evaluar la modificación de la capacidad de autodepuración de los ríos por efecto del cambio climático. Tesis de Doctorado en Ingeniería, UNAM.
24. Pedraza, G. (1996). Geomorfología, procesos, métodos y aplicaciones. Editorial Rueda. Madrid.
25. Taylor & Bogdan (1987). Introducción a los métodos cualitativos de investigación.
26. Van Liew, M. Arnold, J. and Bosch, D. (2005): Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. Transaction of the American Society of Agriculture. Vol. 48: 1025-1040.



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE  
Y ENERGÍA



**AMEXCID**  
AGENCIA MEXICANA  
DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL  
PARA EL DESARROLLO

FONDO DE COOPERACIÓN  
**MÉXICO  
CHILE**

**agciChile**  
Cooperación Chilena para el Desarrollo  
Ministerio de Relaciones Exteriores



**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
TEMUCO**



EVALUACIÓN DE SERVICIOS

# ECOSISTÉMICOS

Y DE RIESGOS POR CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE

# CHILE Y MÉXICO

