

Evaluación del riesgo ante el cambio climático de los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua dulce en la Isla Grande de Chiloé, Chile

Assessment of the Risk to Ecosystem Services for Freshwater Regulation and Provision in Isla Grande de Chiloé, Chile, due to Climate Change

Inti Lefort Valenzuela ^{a,b,c,d,*} , Marco Billi ^{b,c,d} ,
Mauricio Galleguillos ^{c,e} , Anahí Urquiza ^{c,d,f} 

*Autor de correspondencia: ^a Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Santiago Chile. inlefort@ug.uchile.cl

^b Universidad de Chile, Departamento de gestión e innovación rural, Santiago, Chile.

^c Centro de investigación del Clima y la Resiliencia CR², Chile.

^d Centro de investigación sistémico transdisciplinario (NEST.R³), Chile.

^e Universidad Adolfo Ibáñez, Facultad de ingeniería y ciencias, Santiago, Chile.

^f Universidad de Chile, Facultad de ciencias sociales, Santiago, Chile.

ABSTRACT

The freshwater availability of Chiloé Island is threatened by a probable decrease in precipitation in the XXI century. Therefore, preserving ecosystem services, particularly those linked to water provision and regulation, is crucial for local human development. This study seeks to gauge the risk of these services by considering the ecosystem structure, processes, and human pressures. Employing the risk analytical framework, this study utilized an impact chain and a fuzzy logic tool. This study revealed that 37.5 % of the area faced high risk, 36.4 % medium risk, and 26.1 % low risk. Notably, high-risk concentrations were identified in regions with increased human intervention in the island's northern region. These outcomes underscore the urgency to implement public policies that embrace nature-based solutions to conserve and restore Ecosystem Services. Such strategies aim to ensure efficient adaptation to climate change, while respecting the island's local biodiversity.

Keywords: water-related ecosystem services, risk index, climate change adaptation, Chiloé.

RESUMEN

La disponibilidad de agua en la Isla Grande de Chiloé está amenazada por la probable disminución de precipitaciones durante el siglo XXI. Ante este escenario, la preservación de los servicios ecosistémicos, especialmente los relacionados con la provisión y regulación del agua, se vuelve crucial para el desarrollo humano en la región. Este estudio propone evaluar el riesgo de estos servicios, considerando la estructura y los procesos de los ecosistemas, con las presiones humanas locales. Utilizando el marco analítico de riesgo, el estudio aplicó la herramienta cadena de impacto y lógica difusa para la elaboración de un índice de riesgo. Los resultados indicaron que el 37,5 % del área presenta un riesgo alto, 36,4 % medio y 26,1 % bajo. La concentración de riesgo alto se encontró en zonas con mayor intervención humana, en la parte norte de la isla. Estos hallazgos resaltan la necesidad de implementar políticas públicas que empleen soluciones basadas en la naturaleza para conservar y restaurar los servicios ecosistémicos. Así, se busca adaptarse eficientemente al cambio climático, manteniendo coherencia con la biodiversidad local en Chiloé.

Palabras clave: servicios ecosistémicos relacionados al agua, índice de riesgo, adaptación al cambio climático, Chiloé.

INTRODUCCIÓN

La acción humana ha generado múltiples efectos a escala global, como el cambio climático o a escala local como la sobreexplotación de recursos y degradación de los ecosistemas, disminuyendo las funciones y servicios que estos proveen (IPCC 2021, Li *et al.* 2022). Estas escalas se retroalimentan, generando impactos en el bienestar y salud de la población, desarrollo económico, los ecosistemas y su biodiversidad, todos dependientes de la disponibilidad hídrica (Urquiza y Billi 2020, Scott *et al.* 2021). Entender los factores locales que agudizan esta retroalimentación es

necesario para desarrollar políticas de adaptación al cambio climático, considerando los múltiples usos del agua, su cantidad, calidad y oportunidad. En Chile, con especial énfasis en la zona centro sur (32 °- 44 ° latitud sur), donde la mayoría de los Modelos Climáticos Globales indican una disminución de las precipitaciones de hasta un 50 % durante este siglo (IPCC 2021, Hodnebrog *et al.* 2022), tendencia que se apreciará de manera más marcada en otoño (González-Reyes y Muñoz 2013).

Entre los factores locales, se encuentran las estructura y procesos ecosistémicos que regulan el ciclo hidrológico, incidiendo en la escorrentía, infiltración, almacenamien-

to, evapotranspiración y calidad del agua (Brognia *et al.* 2017, Frêne *et al.* 2022). Estas interacciones dan origen a los Servicios Ecosistémicos, definidos como las contribuciones que los ecosistemas al bienestar humano (Costanza *et al.* 1997, Millennium Ecosystem Assessment 2003, Haines-Young & Potschin 2018). Conservar y restaurar aquellas estructuras y procesos ecosistémicos que sustentan estos servicios es fundamental para adaptarse al cambio climático (Casagrande *et al.* 2021). Las soluciones basadas en la naturaleza son propuestas de adaptación con efectos de largo plazo y costo eficientes, para la restauración y mantención de los servicios ecosistémicos (Keesstra *et al.* 2018) estas medidas, pueden ayudar a enfrentar los riesgos climáticos y promover la conservación de la biodiversidad (Hua *et al.* 2022).

Para generar información que apoye el diseño e implementación de soluciones basadas en la naturaleza, se propone la caracterización del riesgo de los servicios de provisión y regulación de agua, frente a amenazas climáticas, en la isla grande de Chiloé, considerando condiciones ecosistémicas y presiones antrópicas locales. Primero se caracterizan los servicios ecosistémicos relevantes en el territorio y su relación con los sistemas ecológicos y socio-productivos. Para determinar el riesgo, se utiliza el marco conceptual de riesgo propuesto por el CR² (2018) y la herramienta Cadena de impacto (GIZ 2017), seleccionando variables útiles para cuantificar las diferentes dimensiones del riesgo, operacionalizadas espacialmente mediante el uso de lógica difusa (Zadeh 1965), resultando en una categorización del riesgo en tres clases; baja, media y alta. Finalmente se realiza un análisis factorial para determinar las variables que más influyen en el riesgo (Cuadras 2014). Esta clasificación permite priorizar áreas donde aplicar soluciones basadas en la naturaleza, promoviendo la gestión eficiente y coherente con la biodiversidad local, del riesgo ante el cambio climático de los servicios ecosistémicos de provisión y regulación de agua.

MÉTODOS

Área de estudio. Isla Grande de Chiloé, la isla de mayor tamaño del archipiélago homónimo, ubicado en la región de Los Lagos (40,3° - 43,7° S) en el centro sur de Chile (figura 1). Se encuentran dos tipos de clima “Cfb Marino de la costa occidental (verano cálido)” en la costa hacia el continente desde los ~41° 50’ S a ~42° 20’ S y toda la isla desde ~42° 50’ S a ~43° 3’ S y “Cfb Marino de la costa occidental (verano cálido y seco)” en la costa hacia el océano pacífico entre ~41° 50’ S a ~42° 20’ S y toda la isla entre 42° 20’ S y 42° 50’ S (Sarricolea *et al.* 2017). En cuanto a la vegetación se puede encontrar; “Bosque siempreverde templado interior de *Nothofagus nitida* - *Podocarpus nubigenus*”, “Bosque resinoso templado costero de *Fitzroya cupressoides*” y “Bosque resinoso templado costero de *Pilgerodendron uvifera* - *Tepualia stipularis*” (Luebert y Plissock 2017), también se encuentran grandes

extensiones de turberas en su mayoría del género *Sphagnum*, como por ejemplo *Sphagnum magellanicum* Brid. (Castro *et al.* 2015). Los suelos son ultisol y andisol (CI-REN 2002), de origen volcánico y glacial, con un periodo de anegamiento de agua largo y bajo nivel freático, por una capa impermeable encontrada aproximadamente a 50 cm bajo la superficie (CI-REN 2002, Armesto *et al.* 2010). En la provincia de Chiloé habitan 158.363 personas, la mayoría en la Isla Grande, sus tres ciudades concentran más del 60 % de la población: Ancud (24 %), Castro (21 %) y Quellón (17 %) (INE 2017). Sus actividades económicas son la pesca, ganadería, agricultura y silvicultura, utilizando madera nativa para construcciones de casas, embarcaciones y leña. Durante la década de los 80’ empezó el desarrollo intensivo de la acuicultura, produciendo un auge económico, aumentando la población y la migración hacia las ciudades (Barrena *et al.* 2014, Bustos y Román 2019).

La industria forestal, la agricultura, parcelaciones y la explotación del bosque nativo son las mayores presiones hacia los ecosistemas en el área de estudio (Alonso *et al.* 2020, Frêne *et al.* 2022), provocando degradación en los ecosistemas, su estructura, composición y servicios (Armesto *et al.* 2010, Técher y Bwerthier 2023). Las proyecciones climáticas estiman una reducción de las precipitaciones de hasta un 50 % en el verano para el 2100 (IPCC 2021, Hodnebrog *et al.* 2022). Esto, sumado a la estacionalidad de las precipitaciones en invierno (Viale *et al.* 2019) y la ausencia de agua en forma de hielo o nieve, deja a este territorio con riesgo de enfrentar escasez hídrica en época estival.

Servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua dulce. Refiere al mantenimiento del flujo base, el control de erosión, la provisión de agua dulce y regulación de la calidad del agua (Hughes y Millennium Ecosystem assessment 2003, Carvalho-Santos *et al.* 2014, Haines-Young & Potschin 2018, Avila-García *et al.* 2020). Estos fenómenos están determinados por la estructura y procesos ecosistémicos, los que se ven afectados por perturbaciones naturales y antropogénicas (Brognia *et al.* 2017, Smith-Ramírez *et al.* 2023). Se utiliza el modelo conceptual de cascada de Servicios Ecosistémicos, por Haines-Young y Potschin (2018), para relacionarlos con el riesgo (figura 2). Este modelo vincula las estructuras y procesos biofísicos con un servicio hacia los seres humanos (servicios ecosistémicos) generando beneficios y valor e indicando que existen presiones derivadas del aprovechamiento de estos servicios, sobre aquellas estructuras y procesos que los generan y que pueden comprometer la existencia de dichos servicios en un futuro. Por último, se reconoce el rol que las soluciones basadas en la naturaleza pueden tener para mantener las estructuras y procesos de los ecosistemas que dan sustento a sus servicios (Keesstra *et al.* 2018).

Marco analítico de riesgo. Se utiliza el marco de evaluación del riesgo (GIZ 2017, CR² 2018). Entendiendo el riesgo como las probables secuelas, derivadas de situaciones pun-

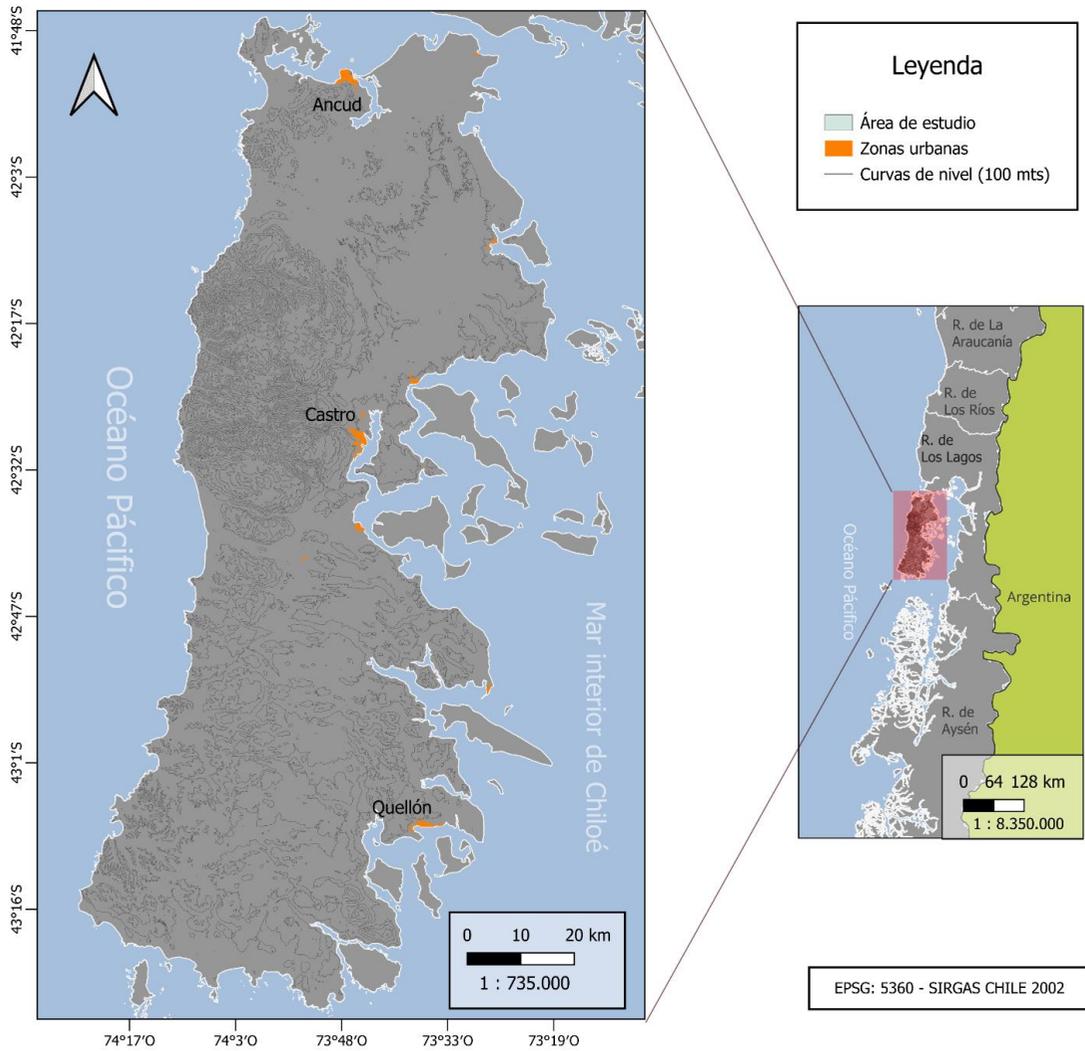


Figura 1. Área de estudio, Isla Grande de Chiloé, región de Los Lagos, Chile. Elaboración propia
 Study area, Chiloé Island, Los Lagos, Chile. Own elaboration

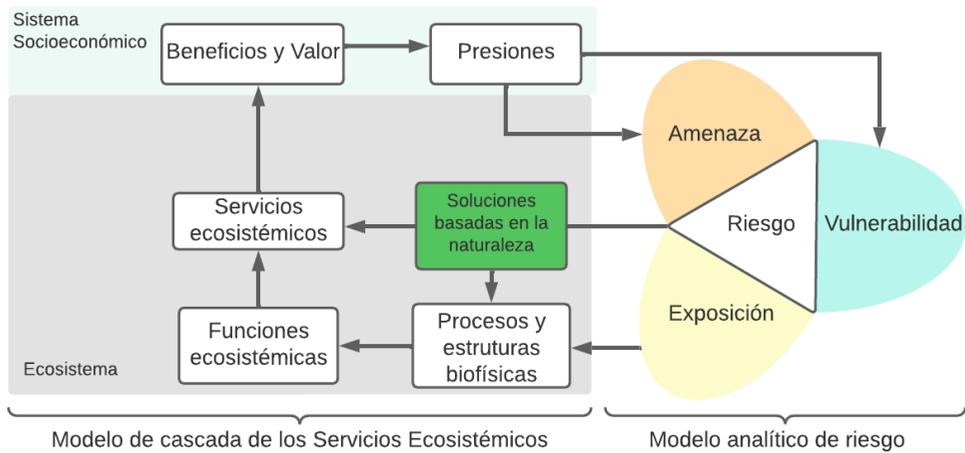


Figura 2. Reinterpretación del modelo de cascada de los Servicios Ecosistémicos y el marco analítico de riesgo. Elaboración propia en base a GIZ 2017, Haines-Young & Potschin 2018, CR² 2018.

Reinterpretation of the Ecosystem Services cascade model and risk analytical framework. Own elaboration based on GIZ 2017, Haines-Young & Potschin 2018, CR² 2018.

tuales o tendencias (locales o globales) sobre algo de valor, compuesto por tres dimensiones: amenaza, exposición y vulnerabilidad (figura 2). Las amenazas son fenómenos derivados de la variabilidad natural o antropogénica del clima. La exposición es la representación de aquello “valioso”, en este estudio serían las estructuras o procesos que sustentan los Servicios Ecosistémicos de provisión y regulación de agua (GIZ 2017, Haines-Young y Potschin 2018).

La vulnerabilidad es un concepto compuesto que caracteriza qué tan sensible es aquello expuesto respecto las amenazas, la capacidad de respuesta, entendido como la aptitud de los sistemas ecológicos, técnicos y sociales para generar una respuesta de mitigación a las amenazas y la capacidad de adaptación que da cuenta de la aptitud de los sistemas que se encuentran en un territorio de reflexionar y llevar adelante acciones de respuesta flexibles ante las amenazas, estos dos últimos conceptos son acuñados como resiliencia en CR² (2018).

Cadena de impacto. Para operacionalizar el marco analítico de riesgo se utiliza la herramienta cadena de impacto, que facilita la comprensión, sistematización y priorización de las variables que determinan el riesgo estudiado (GIZ 2017). Las partes constituyentes de esta cadena coinciden con las conceptualizadas en el riesgo (amenazas, exposición y vulnerabilidad). La cadena de impacto contempla siete pasos según lo detallado en el “Marco metodológico

para caracterizar la Vulnerabilidad Hídrica Territorial”, en Álamos *et al.* (2021). Primero se obtiene una representación teórica del riesgo, donde cada parte de esta cadena está basada en evidencia científica. Luego para obtener una medición empírica es necesario la representación cuantitativa de las dimensiones del riesgo, buscando variables que las representen y cumplan con los criterios establecidos para incluirlas en el índice de riesgo (ver *selección de variables*). Lo anterior fue realizado mediante un análisis bibliográfico en ISI-Web of science y Scopus. La figura 3 muestra cómo se configuraron las distintas variables respecto al riesgo.

El riesgo estudiado en este artículo se define como una disminución de servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua debido a los efectos del cambio climático. Las estructuras y procesos biofísicos que dan sustento a estos servicios se caracterizan como exposición. Sobre ellos se desarrollan los impactos intermedios, donde las amenazas derivadas del cambio climático, mediadas por las variables de sensibilidad y resiliencia, determinan el impacto de las amenazas sobre lo expuesto (CR² 2018). Por ejemplo, suelo con una mayor capacidad de retener agua son menos sensibles ante la amenaza de frecuencia de sequías y dando más sustento a los ecosistemas ante este fenómeno (Van Es *et al.* 2016).

Si bien la cadena de impacto teórica considera el concepto de resiliencia, esta dimensión del riesgo no se midió cuantitativamente, debido a los requerimientos en tiempo

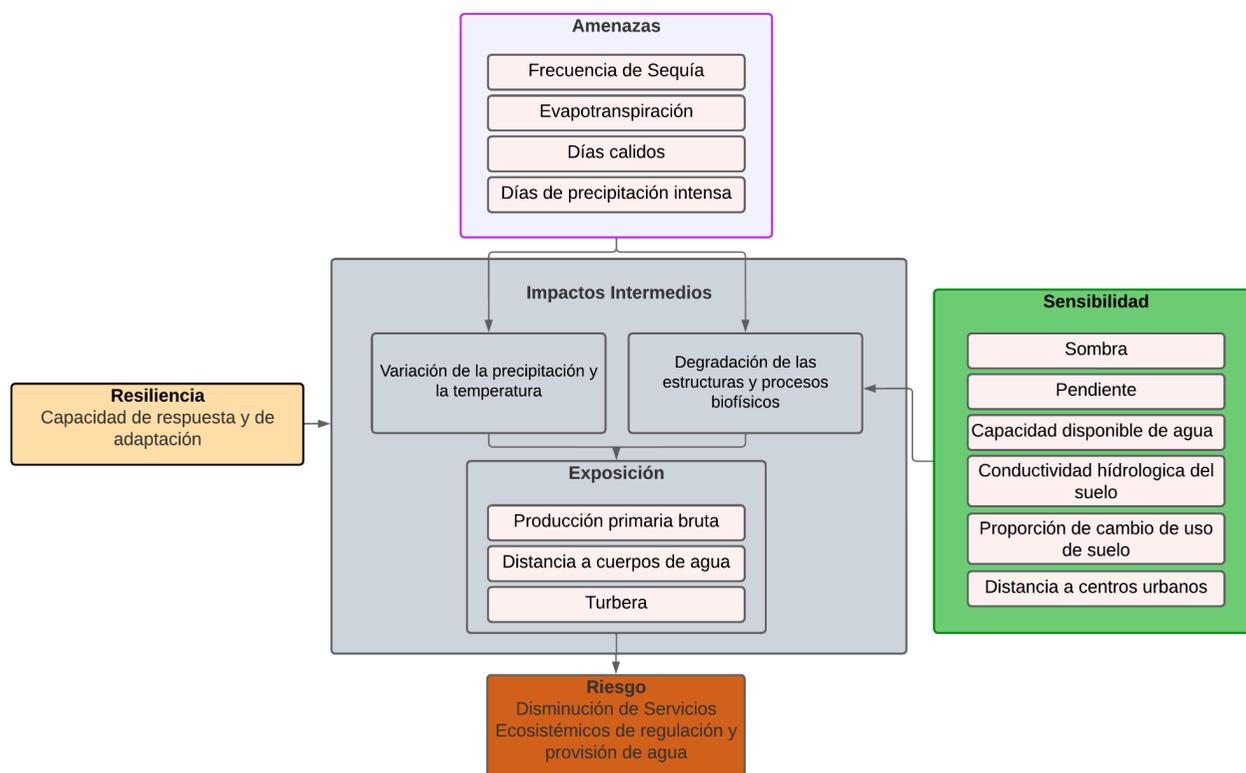


Figura 3. Cadena de impacto sobre los Servicios Ecosistémicos de regulación y provisión de agua. Elaboración propia.

Impact chain over the Ecosystem services of regulation and provision of water. Own elaboration.

y recursos. Se consideran variables que caractericen la amenaza, exposición y sensibilidad.

Selección y procesamiento de variables. Para ser utilizadas en el índice compuesto de riesgo, las variables deben cumplir: (a) relación empírica con el fenómeno estudiado, respaldado por literatura científica; (b) los datos deben cumplir con las condiciones técnicas; información espacial grillada y que exista espacial y temporalmente en el área de estudio.

La resolución espacial es de 100 m, en esta escala se logra representar adecuadamente las diferencias topográficas y cambios posibles en los usos de suelo. La manipulación y la edición de datos espaciales se realizó utilizando el software QGIS 3.24 (QGIS 2022).

Las variables utilizadas en el índice compuesto de riesgo se listan en la tabla 1, detallando la dimensión del riesgo a la que pertenecen, su nombre, la fuente desde donde se adquieren los datos, la resolución espacial nativa y la unidad de medición de dichas variables.

Amenazas. Fueron obtenidas del Atlas de Riesgo Climático (ARClím) (MMA 2020) y se seleccionaron en función de aquellas variables que pueden alterar las estructuras y funciones de los ecosistemas. Algunas de estas variables afectan de forma directa algunos servicios ecosistémicos, como por ejemplo la amenaza de frecuencia de sequía afecta directamente el servicio de provisión de agua dulce. Proviene de simulaciones climáticas y representan las condiciones medias en el futuro cercano (2035 - 2065)

bajo el escenario RCP8.5, escenario donde las emisiones de gases de efecto invernadero siguen la tendencia actual, es decir sin una disminución considerable de estas (Rojas *et al.* 2019) y utilizando el promedio para cada píxel entre 25 modelos globales. Su resolución abarca los 5 x 5 km y se encuentran en formato vectorial.

Exposición. Proviene de diferentes fuentes de información y tiene como objetivo identificar territorialmente procesos y estructuras relacionados con servicios ecosistémicos. Algunas, como la presencia de turberas se catalogan de forma inmediata como de exposición alta, debido a la importancia de estas para la regulación del ciclo hidrológico (Dominguéz y Vega-Valdés 2015). Otras, como la producción primaria Bruta (PPB), sirven para estimar el vigor de la vegetación lo que se relaciona directamente con la capacidad de esta de otorgar servicios ecosistémicos.

Sensibilidad. Representan la susceptibilidad de las estructuras y funciones de los ecosistemas ante las amenazas analizadas. En este sentido, estas variables están condicionadas a la selección de variables de exposición y amenaza, ya que deben estar relacionados con los componentes ecosistémicos estudiados y a su vez representan lo sensible de estos ante las amenazas (Urquiza y Billi 2020).

Índice compuesto de riesgo. Para la agregación de las variables se utilizó lógica difusa (Zadeh 1965), metodología matemática que utiliza múltiples variables y les asigna valores entre 0 (completamente falso) y 1 (completamente

Tabla 1. Variables utilizadas en la elaboración del índice de riesgo compuesto.
 Variables used in the elaboration of the composite risk index.

Dimensión del riesgo	Nombre variable	Fuente	Resolución espacial original	Unidad
Amenaza	Evapotranspiración	ARClím	5 x 5 km	mm día ⁻¹
Amenaza	Días cálidos	ARClím	5 x 5 km	días
Amenaza	Frecuencia sequía	ARClím	5 x 5 km	adimensional
Amenaza	Días de precipitación muy intensa	ARClím	5 x 5 km	Días
Exposición	PPB (GPP)	MODIS17 USGS	500 x 500 m	kg C m ⁻² [anual]
Exposición	Distancia a cuerpos de agua	Elaboración propia	100 x 100 m	m
Exposición	Turberas	Ministerio del Medio Ambiente	100 x 100 m	adimensional
Sensibilidad	Mapa de sombra	DEM ALOS-PALSAR	12,5 x 12,5 m	adimensional
Sensibilidad	Pendiente	DEM ALOS-PALSAR	12,5 x 12,5 m	grados
Sensibilidad	Capacidad total disponible de agua (Total_AWC)	Dinamarca <i>et al.</i> 2022	100 x 100 m	mm
Sensibilidad	Conductividad hidrológica del suelo (ksat)-CV	Dinamarca <i>et al.</i> 2022	100 x 100 m	cm día ⁻¹
Sensibilidad	Cambios en uso de suelo	Elaboración propia	27 x 27m	adimensional
Sensibilidad	Distancia a centros urbanos	Elaboración propia	100 x 100 m	m

verdadero) para una categoría definida, asignando valores intermedios para representar incertidumbre o ambigüedad. Esta metodología puede lograr una estandarización de los distintos valores de los objetos espaciales, permitiendo la comparación de distintos niveles de sensibilidad, exposición y amenazas en el territorio (Araya-Muñoz *et al.* 2017). Todos los pasos de la lógica difusa se realizaron usando el paquete skfuzzy 0.4.2 (Warner *et al.* 2019) en Python. La manipulación de datos previa a la lógica difusa se realizó con los paquetes Numpy (Harris *et al.* 2020) y Pandas (The pandas development team 2022) en Python.

Primero se crearon las funciones de membresía para cada variable, divididas en 3 categorías; alta, media y baja. Realizado mediante el uso de bibliografía cuando estuviese disponible, consulta a expertos y análisis del histograma de su distribución, como lo indica Medasani *et al.* 1998. Luego se realizó la agregación de variables, usando lógica difusa, obteniendo un índice de amenaza, exposición y sensibilidad, finalmente se reiteró el proceso para obtener el índice de riesgo.

Análisis factorial. Finalmente se aplicó un Análisis Factorial exploratorio sobre el índice de riesgo, para identificar aquellas variables que explican la mayor cantidad de varianza del índice (Cuadras 2014), identificando las variables más significativas del riesgo y lo que permite idear políticas públicas focalizadas en ellas. Se aplicaron la prueba de Bartlett y la prueba de Kaiser-Meyer-Olkin para corroborar que este análisis puede ser aplicados a los datos obtenidos (IBM 2023). Se considera un valor de 0,3 en las cargas factoriales para la inclusión de la variable en cada factor (Bandalos y Finney 2010). Este análisis fue realizado utilizando el paquete de Python factor-analyzer 0.4.1.

RESULTADOS

Índice de riesgo compuesto. El área evaluada corresponde a 7.980 km² (798.026 celdas) de la isla grande de Chiloé. La tabla 2 indica el porcentaje de área en cada categoría de riesgo y sus dimensiones. Se observa una predominancia marginal de la categoría ‘alto’. Sin embargo, los resultados de riesgo no son una respuesta lineal de la amenaza, exposición y sensibilidad, ya que responde a un conjunto

Tabla 2. Porcentaje de área del riesgo y sus dimensiones en cada categoría.

Percentage of risk area and its dimensions in each category.

Índice	% bajo	% medio	% alto
Riesgo	26,1 %	36,4 %	37,5 %
Amenaza	28,7 %	54,5 %	16,8 %
Exposición	0,0 %	71,8 %	28,1 %
Sensibilidad	48,3 %	26,7 %	25,0 %

de reglas propuestas, funciones de membresía y su combinación geográfica.

En la figura 4A, se observa un contraste entre la parte noroeste, donde se puede observar una predominancia de riesgo alto, frente a la parte sureste donde se observa una predominancia de riesgo bajo. Coherente con los antecedentes de ocupación de la isla: la parte norte ha tenido una mayor intervención antrópica, dada la proximidad a la principal entrada hacia la isla desde el continente por el canal de Chacao y donde se encuentran los centros urbanos más poblados. La parte sur ha tenido una menor intervención, por lo que su sensibilidad ligada a las acciones humanas es menor. Otro factor determinante es la cordillera de Piuchén, emplazada en la parte oeste de la isla desde el canal de Chacao al lago Cucao, esta cordillera presenta pendientes sensibles a la erosión del suelo y varios cuerpos de agua están relacionados con ella (figura 4C), como el río Chepu, la cuenca más grande de la isla. Cabe destacar la influencia climática en el riesgo, replicando grosso modo la caracterización climática para el área de estudio, indicado en la figura 4B. Por último, se aprecia en la figura 4D la poca heterogeneidad espacial que aporta la exposición al análisis de riesgo.

Análisis factorial. El resultado de la prueba de Bartlett arrojó un *P*-valor de 0,0 y para Kaiser-Meyer-Olkin un valor de 0,65, concluyendo que los datos son aptos para el análisis factorial. El análisis factorial arrojó que son tres los factores que aportan una mayor cantidad de varianza al índice de riesgo. La tabla 3 indica las contribuciones únicas de cada variable a los tres factores definidos.

Tabla 3. Resultados análisis factorial.

Factor analysis results.

Variables	Factor		
	0	1	2
Evapotranspiración	0,231	0,662	0,132
Días cálidos	0,983	0,171	0,078
Frecuencia sequía	-0,791	0,003	0,052
Días de precipitación muy intensa	-0,275	0,826	-0,274
PPB (GPP)	-0,032	-0,026	0,015
Distancia a cuerpos de agua	0,148	-0,291	-0,090
Mapa de sombra	-0,017	-0,032	-0,010
Pendiente	0,194	0,495	-0,075
Cambios en uso de suelo	-0,128	-0,021	0,073
Distancia a centros urbanos	0,819	-0,107	-0,150
Capacidad total disponible de Agua (AWC)	-0,116	0,523	0,494
Conductividad hidrológica del Suelo (ksat)-CV	-0,069	0,007	0,350

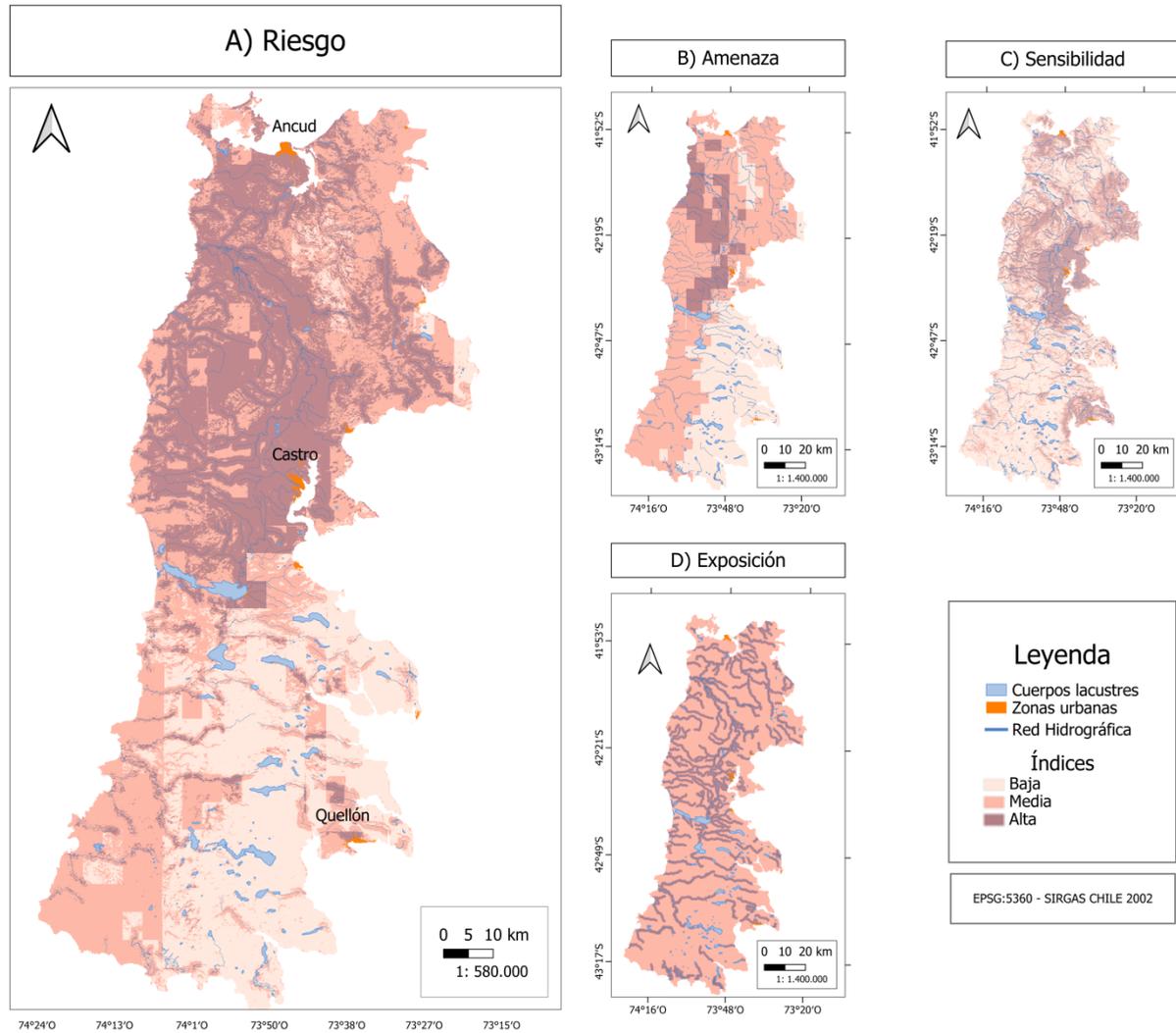


Figura 4. Índice de riesgo de los servicios ecosistémicos de provisión y regulación de agua dulce en la isla grande de Chiloé. (A) índice de riesgo, (B) Amenazas, (C) Sensibilidad y (D) Exposición. Elaboración propia.

Risk index of the ecosystem services of freshwater provision and regulation on the large island of Chiloé, (A) Risk index, (B) Threats, (C) Sensitivity and (D) Exposure. Own elaboration.

Para el primer factor fueron seleccionadas; días cálidos y distancia a centros urbanos, el segundo; evapotranspiración, días de precipitación muy intensa, pendiente y capacidad total disponible de agua (AWC) y el tercer factor la capacidad total disponible de agua (AWC) y Conductividad hidrológica del suelo (ksat)-CV. Destaca la preponderancia de las amenazas climáticas sobre el riesgo, factores no son gestionables con políticas de índole local, pero que resaltan la importancia de la mitigación de estas en forma global. La distancia a centros urbanos revela la importancia de conservar los ecosistemas adyacentes a las ciudades que aportan disminución de inundaciones, provisión de agua y también beneficio recreacional sobre las personas. Las variables de pendiente y de relación suelo-agua son fundamentales por su rol en la escorrentía y la potencialidad de ser resguardadas con soluciones basadas

en la naturaleza. La dimensión de exposición presenta solo dos categorías, media y alta (tabla 2), aportando en menor medida a la distinción de zonas más riesgosas. Esto es reforzado por el análisis factorial, no resultando ninguna variable de exposición con una carga factorial suficiente para ser considerado en los factores.

DISCUSIÓN

El índice de riesgo, expresado en la tabla 2 indica que solo un 26,1 % de la zona evaluada se encuentra en un nivel bajo, en contraste un 37,5 % del territorio esta con un nivel alto, concentrado en las áreas con mayor población de la Isla. La disminución de disponibilidad de agua ya se ha hecho presente en Chiloé, el 2021 se declaró zona de escasez hídrica a toda la provincia, los efectos del cambio climáti-

co ya han sido percibido por sus habitantes y la comunidad científica del territorio (Sapiains *et al.* 2019), reconociendo impactos ambientales y sociales, aumento de vulnerabilidad y conflictos socioambientales (Guerrero 2019, Frêne *et al.* 2022). En la zona de estudio ya se han declarado zonas de escasez hídrica, las cuales son determinadas en función de índices de precipitación (DGA 2012), lo que indica anomalías con los patrones de precipitación en la actualidad, los que podrían verse afectados de mayor manera en el futuro y su impacto en la población ser más agudos por los deterioros en los servicios ecosistémicos de la isla.

En este contexto, es importante considerar soluciones basadas en la naturaleza para la conservación y recuperación de servicios ecosistémicos en las áreas de mayor riesgo. Al contrario de las soluciones tradicionales, que consideran grandes y costosas infraestructuras, con una alta demanda de recursos para su mantención (Ramos *et al.* 2007, Keestra *et al.* 2018), como embalses y canalizaciones. Las soluciones basadas en la naturaleza aprovechan los ciclos y procesos naturales de la materia y energía, proveyendo propuestas más adecuadas a las condiciones locales y los cambios estacionales de los ecosistemas (Meli *et al.* 2014, Keestra *et al.* 2018). De esta forma requieren menor mantención y control para funcionamiento, otorgando beneficios adicionales como la conservación de la biodiversidad y la salud humana (Hua *et al.* 2022). La aplicación de estas soluciones debe ser sitio específica, considerando aspectos sociales, ecológicos, de gobernanza y adaptación (Eggermont *et al.* 2015, UICN 2016). De no ser así, pueden traer una serie de consecuencia no deseadas, véase por ejemplo Hoyos-Santillan (2021). Si bien el concepto de soluciones basadas en la naturaleza emerge sobre la discusión para la adaptación el cambio climático, este tipo de intervenciones no son nuevas, en el mundo andino se utilizaron durante años en la época precolombina para la “siembra y cosecha de agua”, utilizando infraestructuras para retener, almacenar e infiltrar aguas-lluvias (Vivas 2022). Otros ejemplos son descritos en Martos-Rosillo *et al.* (2019), donde se mencionan los canales de infiltración de montaña y sus beneficios para la mantención del flujo base y el aumento de la biodiversidad en los ambientes circundantes.

El análisis de riesgo puede combinarse con técnicas de modelación hidrológica, para determinar variables incidentes del ciclo del agua. Sin embargo, la falta de información sobre caudales y forzantes meteorológicas en la isla grande de Chiloé dificulta la realización de estos análisis. En contraste, la metodología propuesta en este texto tiene la ventaja de poderse aplicar en contextos de información limitada.

Por último, cabe destacar que el 96 % de la superficie de la isla grande de Chiloé tiene datos suficientes para calcular el índice de riesgo, otorgando validez desde la representatividad territorial. Entregando información a una escala de 100 m, escala más detallada en comparación al nivel comunal, ampliamente utilizada en otras estimaciones de riesgo (MMA 2020, Araya-Muñoz *et al.* 2017)

CONCLUSIONES

Incluir los Servicios Ecosistémicos en la planificación territorial trae beneficios claves para enfrentar el cambio climático. En este sentido la valoración social e institucional es necesaria para incluirlos, así como herramientas y metodologías que permitan identificar áreas y procesos clave para estos servicios. En el área de estudio, considerando el régimen de precipitaciones y la variación que sufrirá en los próximos años, toma importancia la mantención de las estructuras y procesos que sostienen estos servicios, para asegurar una provisión de agua durante todo el año. Este problema debe verse reflejado en las políticas y programas que regulan el uso y conservación del suelo del suelo, entendiendo de manera integral las distintas interacciones que se producen en las cuencas. La inclusión de soluciones basadas en la naturaleza emerge como una respuesta para los desafíos del cambio climático, obstaculizadas por el actual paradigma de manejo fragmentado del territorio y las tensiones que esto provoca entre los usuarios “aguas arriba y aguas abajo”, emergiendo la necesidad de una visión integrada de las cuencas para alcanzar la seguridad hídrica. Se deben considerar la complejidad de interrelaciones que ocurren en los territorios, observando los diferentes sistemas que los componen (sociales, técnicos y ecológicos), para adoptar caminos de adaptación viables entre ellos.

La herramienta cadena de impacto para analizar riesgo climático, ha sido por la política pública para considerar el cambio climático en la toma de decisiones (SEA 2023), siendo en este sentido un análisis que considera las actuales tendencias y marcos teóricos/prácticos para la gestión de medidas de adaptación al cambio climático con coherencia institucional.

En cuanto a la elaboración y operacionalizan del índice de riesgo, surge la necesidad de contar con más y mejor información, hidrológica, climática y de los flujos suelo-planta-atmosfera. Que permita tomar decisiones basadas en evidencia científica, incluyendo la elaboración de metodologías que puedan evaluar el comportamiento de las variables y sus puntos de inflexión, para entender los límites de los ecosistemas.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Inti Lefort: idea original, redacción, marco teórico y metodológico, análisis de datos. Marco Billi: marco teórico y metodológico, revisión de redacción. Mauricio Galleguillos: marco metodológico. Anahí Urquiza: marco teórico.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación fue financiado por el proyecto FON-DAP/ANID 1523A0002 y el proyecto SSHRC n° 895-2022-1016.

REFERENCIAS

- Álamos N, T Monsalve, M Billi, I Lefort, A Allendes, J Navea, R Calvo, A Urquiza. 2021. Vulnerabilidad hídrica territorial: marco analítico y aplicaciones. *Documento de Trabajo NEST-R3* 3. DOI: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/AGJ6P>
- Alonso C, N Gardella, A Mascareño. 2020. Chiloé-Atlas: visiones socioecológicas. *Centro de Estudios Públicos (CEP)*. 11 p.
- Araya-Muñoz D, MJ Metzger, N Stuart, AMW Wilson, D Carvajal. 2017. A spatial fuzzy logic approach to urban multi-hazard impact assessment in Concepción, Chile. *Science of the Total Environment* 576: 508–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.077>
- Armesto JJ, D Manushevich, A Mora, C Smith-Ramirez, R Rozzi, A Abarzua. 2010. From the Holocene to the Anthropocene: a historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15,000 years. *Land Use Policy* 27: 148–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.07.006>
- Avila-García D, J Morato, AI Perez-Maussion, P Santillan-Carvantes, J Alvarado, FA Comin. 2020. Impacts of alternative land-use policies on water ecosystem services in the Rio Grande de Comitán-Lagos de Montebello watershed, Mexico. *Ecosystem Services* 45: 101179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101179>
- Bandalos DL, SJ Finney. 2010. Factor analysis: exploratory and confirmatory. In Hancock GR, RO Mueller eds. Reviewer's guide to quantitative methods. Nueva York: Routledge.
- Barrena J, L Nahuelhual, A Báez, I Schiappacasse, C Cerda. 2014. Valuing cultural ecosystem services: agricultural heritage in Chiloé island, southern Chile. *Ecosystem Services* 7: 66–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.12.005>
- Brogna D, C Vincke, Y Brostaux, H Soyeurt, M Dufrière, N Dendoncker. 2017. How does forest cover impact water flows and ecosystem services? Insights from “real-life” catchments in Wallonia (Belgium). *Ecological Indicators* 72: 675–685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2016.08.011>
- Bustos B, Á Román. 2019. A sea uprooted: islandness and political identity on Chiloé Island, Chile. *Island Studies Journal* 14(2): 97–114. DOI: <https://doi.org/10.24043/isj.91>
- Carvalho-Santos C, JP Honrado, L Hein. 2014. Hydrological services and the role of forests: conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale. *Ecological Complexity* 20: 69–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.09.001>
- Casagrande E, F Recanati, MC Rulli, D Bevacqua, P Melià. 2021. Water balance partitioning for ecosystem service assessment: a case study in the Amazon. *Ecological Indicators* 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2020.107155>
- Castro JMT, A Saldaña, MJ Rondanelli-Reyes. 2015. Historia vegetal y regímenes de fuego recientes de la turbera costera de Chepu, Isla Grande de Chiloé, Chile. *Gayana - Botánica* 72(2): 340–349. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-66432015000200014>
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, CL). 2002. Estudio agrológico X Región: descripciones de suelos, materiales y símbolos. Santiago: CIREN.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia ((CR)2, CL). 2018. Marco de evaluación de la vulnerabilidad. 30 p. Consultado el 15 jun. 2023. Disponible en: http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/06/MARCO_VULNERABILIDAD_CR2_2018.pdf
- Costanza R, R D'Arge, R De Groot, S Farber, M Grasso, B Hannon, K Limburg, S Naeem, RV O'Neill, J Paruelo, RG Raskin, P Sutton, M Van Den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630): 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Cuadras C. 2014. Nuevos métodos de análisis multivariante. *CMC ediciones*. Barcelona, España.
- Dinamarca DI, M Galleguillos, O Seguel, C Faúndez Urbina. 2023. CLSoilMaps: A national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for Chile. *Scientific Data* 10(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02536-x>
- Dirección General de Aguas (DGA, CL). 2012. Resolución N° 1674. Deja sin efecto resolución DGA N° 39, de 9 de febrero de 1984 y establece nuevos criterios para calificar épocas de extraordinaria sequía. Consultado el 15 jun. 2023. Disponible en: https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/resoluciones/Resoluciones/1674_2012.pdf
- Frêne C, M Núñez-Ávila, B Castro, JJ Armesto. 2022. Seasonal Partitioning of Rainfall in Second-Growth Evergreen Temperate Rainforests in Chiloé Island, Southern Chile. *Frontiers in Forests and Global Change* 4(7): 1–8. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.781663>
- GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, DEU), EURAC. 2017. Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook. Consultado el 15 jun. 2023. Disponible en: http://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2017/10/GIZ-2017_Risk-Supplement-to-the-Vulnerability-Sourcebook.pdf
- González-Reyes Á, AA Muñoz. 2013. Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Bosque* 34(2): 191–200. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000200008>
- Gouveia A, H Freitas. 2008. Intraspecific competition and water use efficiency in *Quercus suber*: evidence of an optimum tree density? *Trees* 22: 521–530.
- Guerrero Gatica M, D Manushevich, JJ Armesto. 2019. Local management practices in watersheds of northern Chiloé island: integrating effects on soil physical properties related to water storage. Tesis de Magíster en Ciencias Biológicas, Universidad de Chile.
- Haines-Young R, M Potschin. 2018. CICES V5.1. Guidance on the Application of the Revised Structure. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). Consultado el 29 oct. 2022. Disponible en: <https://cices.eu/resources/>
- Harris CR, KJ Millman, SJ van der Walt, R Gommers, P Virtanen, D Cournapeau, E Wieser, J Taylor, S Berg, NJ Smith, R Kern, M Picus, S Hoyer, MH van Kerkwijk, M Brett, A Haldane, JF del Río, M Wiebe, P Peterson, TE Oliphant. 2020. Array programming with NumPy. *Nature* 585(7825):357–362. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hoyos-Santillan J, A Miranda, A Lara, A Sepulveda-Jauregui, C Zamorano-Elgueta, S Gómez-González, F Vásquez-Lavín, RD Garreaud, M Rojas. 2021. Diversifying Chile's climate action away from industrial plantations. *Environ-*

- mental Science and Policy* 124: 85–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.06.013>
- Hodnebrog Ø, BM Steensen, L Marelle, K Alterskjær, SB Dalsøren, G Myhre. 2022. Understanding model diversity in future precipitation projections for South America. *Climate Dynamics* 58(5–6): 1329–1347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05964-w>
- Hua F, L Adrian Bruijnzeel, P Meli, PA Martin, J Zhang, S Nakagawa, X Miao, W Wang, C McEvoy, JL Peña-Arancibia, PHS Brancalion, P Smith, DP Edwards, A Balmford. 2022. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science* 376(6595): 839–844. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba4649>
- Hughes R, Millennium Ecosystem Assessment. 2003. MA Conceptual Framework. *Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment* 5:a 25–36. Consultado el 15 jun. 2023. Disponible en: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1368980003000806
- IBM. 2023. Prueba de KMO y Bartlett. Consultado el 15 jun. 2023. Disponible en: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/29.0.0?topic=detection-kmo-bartlett-test>
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2017. Resultados comunales del censo 2017. Consultado el 13 ene. 2021. Disponible en: <http://www.censo2017.cl/descargue-aqui-resultados-de-comunas/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2021. Climate change 2021: the physical science basis. In Masson-Delmotte V, P Zhai, A Pirani, SL Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, MI Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, JBR Matthews, TK Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, Yu R, Zhou B eds. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03233-7>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. Resumen para responsables de políticas. In Shukla PR, J Skea, E Calvo-Buendía, V Masson-Delmotte, HO Pörtner, DC Roberts, P Zhai, R Slade, S Connors, R van Diemen, M Ferrat, E Haughey, S Luz, S Neogi, M Pathak, J Petzold, J Portugal-Pereira, P Vyas, E Huntley, K Kissick, M Belkacemi, J Malley eds. El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres. En prensa.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multi capítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. In Field CB, VR Barros, DJ Dokken, KJ Mach, MD Mastrandrea, TE Bilir, M Chatterjee, KL Ebi, YO Estrada, RC Genova, B Girma, ES Kissel, AN Levy, S MacCracken, PR Mastrandrea, LL White eds. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial. 200 p.
- Keesstra S, J Nunes, A Novara, D Finger, D Avelar, Z Kalantari, A Cerdà. 2018. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment* 610-611: 997-1009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077>
- Li D, W Cao, Y Dou, S Wu, J Liu, S Li. 2022. Non-linear effects of natural and anthropogenic drivers on ecosystem services: Integrating thresholds into conservation planning. *Journal of Environmental Management* 321: 116047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116047>
- Luebert F, P Plissock. 2017. Pisos vegetacionales de Chile. Ministerio de Bienes Nacionales, Infraestructura de datos geoespaciales. Consultado el 23 mar. 2023. Disponible en: <https://www.ide.cl/index.php/flora-y-fauna/item/1524-pisos-vegetacionales-luebert-plissock-2017>
- Medasani S, J Kim, R Krishnapurama. 1998. An overview of membership function generation techniques for pattern recognition. *International Journal of Approximate Reasoning* 19: 391-417. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(98\)10017-8](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(98)10017-8)
- Martos-Rosillo S, A Ruiz-Constán, A González-Ramón, R Mediavilla, JM Martín-Civantos, FJ Martínez-Moreno, J Jódar, C Marín-Lechado, A Medialdea, J Galindo-Zaldívar, A Pedrera, JJ Durán. 2019. The oldest managed aquifer recharge system in Europe: New insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology* 578: 124047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124047>
- Meli P, JM Benayas, P Balvanera, MM Ramos. 2014. Restoration enhances wetland biodiversity and ecosystem service supply, but results are context-dependent: A meta-analysis. *PLoS ONE* 9(4). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093507>
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA, CL). 2020. Atlas de Riesgo Climático, Arclim. Consultado el 23 mar. 2023. Disponible en: <https://arclim.mma.gob.cl/>
- Museo Municipal de Castro. 2017. Chiloé y su territorio. Consultado el 23 mar. 2023. Disponible en: <https://www.museodecastro.cl/single-post/2017/01/20/Chilo%C3%A9-y-su-territorio>
- Parsons AJ, L Bracken, R Peoppl, J Wainwright, SD Keesstra. 2015. Editorial: introduction to special issue on connectivity in water and sediment dynamics. *Earth Surface Processes Landforms* 40(9): 1275-1277. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3714>
- QGIS (2022). QGIS Geographic Information System (Version 3.24) [Software]. Open Source Geospatial Foundation Project. Consultado el 29 oct. 2022. Disponible en: <https://qgis.org>
- Ramos MC, R Cots-Folch, JA Martínez-Casasnovas. 2007. Sustainability of modern land terracing for vineyard plantation in a Mediterranean mountain environment—the case of the Priorat region (NE Spain). *Geomorphology* 86(1): 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.004>
- Rojas M, F Lambert, J Ramírez-Villegas, A Challinord. 2019. Chile y la necesidad de adaptarse ante los cambios en las precipitaciones que afectarían la producción agrícola. Policy Brief, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia 1. Agosto 2019. Consultado el 15 jun. 2023. Disponible en: <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/08/Policy-brief-CR2-1-Chile-y-necesidad-de-adaptarse-ante-cambios-en-las-precipitaciones-1.pdf>
- Sapiains R, A Ugarte, J Hasbún. 2019. Percepciones del cambio climático en la isla de Chiloé: desafíos para la gobernanza local. *Magallania* (Chile) 47(1): 83–103. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-22442019000100083>
- Sarricolea P, MJ Herrera, O Meseguer-Ruiz. 2017. Climatic regionalization of continental Chile. *Journal of Maps* 13(2): 66–73. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>

- Scott CA, MI Zilio, T Harmon, A Zuniga-Teran, R Díaz-Caravantes, N Hoyos, GME Perillo, F Meza, RG Varady, AR Neto, MI Velez, F Martín, J Escobar, MC Piccolo, P Mussetta, S Montenegro, JA Rusak, N Pineda. 2021. Do ecosystem insecurity and social vulnerability lead to failure of water security? *Environmental Development* 38(1):100606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100606>.
- Smith-Ramírez C, A Grez, M Galleguillos, C Cerda, A Ocampo-Melgar, MD Miranda, AA Muñoz, A Rendón-Funes, I Díaz, C Cifuentes, A Alaniz, O Seguel, J Ovalle, G Montenegro, A Saldes-Cortés, MJ Martínez-Harms, JJ Armesto, A Vita. 2023. Ecosystem services of Chilean sclerophyllous forests and shrublands on the verge of collapse: A review. *Journal of Arid Environments* 211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104927>.
- Técher D, E Berthier. 2023. Supporting evidences for vegetation-enhanced stormwater infiltration in bioretention systems: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research* 0123456789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25333-w>.
- The pandas development team. 2024. Python, pandas-dev/pandas Pandas versión 2.2.3. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13819579>
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). 2016. Resolución 69 sobre la Definición de soluciones basadas en la naturaleza (WCC-2016-Res-069). Resoluciones, Recomendaciones y otras decisiones de la UICN. 6-10 de septiembre de 2016. Congreso Mundial de la Naturaleza, Honolulu, Hawái, Estados Unidos. Consultado el 21 jul. 2023. Disponible en: https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2016_RES_069_ES.pdf
- Urquiza A, M Billi. 2020. Water markets and social–ecological resilience to water stress in the context of climate change: an analysis of the Limarí Basin, Chile. *Environment, Development and Sustainability* 22(3): 1929–1951. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0271-3>.
- Van Es H, R Schindelbeck, A Ristow, K Kurtz, L Fennell. 2016. Available Water Capacity. Soil Health Manual Series, Fact Sheet Number 16-05. Cornell University, School of Integrative Plant Sciences. 2p.
- Viale M, E Bianchi, L Cara, LE Ruiz, R Villalba, P Pitte, M Masiokas, J Rivera, L Zalazar. 2019. Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Frontiers in Environmental Science* 7: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>.
- Vivas D. 2022. Siembra y cosecha de agua. Crianza del paisaje andino a través de infraestructura natural para la seguridad hídrica. *Arquitecturas vivas. Decolonizar* 110: 72-83. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-69962022000100072>
- Warner J, J Sexauer, T Meggs, A Savio, A Unnikrishnan, G Castelão, F Arruda Pontes, T Uelwer, Fernando Batista, A Buy, W Van den Broeck, W Song, R Abdelkader, M Pérez, JF Power, H Mishra. 2019. Python, version 0.4.2. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3541386>
- Zadeh LA. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3): 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

Recibido: 09.06.24
Aceptado: 23.11.24

