ANÁLISIS ESPACIAL DE VARIABLES AMBIENTALES A TRAVÉS DEL DESARROLLO Y ESTUDIO DE CUENCAS VIRTUALES EN CHILE

Germán A. Daza M.[1], Francisco J. Peñas S.[2] y Enrique Muñoz O.[3]

RESUMEN:

Los sistemas fluviales nos proveen a diario de un gran número de recursos, como son el suministro de agua potable, la producción de alimento y energía, entre tantos otros. Con frecuencia, la preservación de estos recursos y servicios, se ven amenazados como consecuencia de la intervención y sobreexplotación a la que son sometidos, para satisfacer las necesidades propias del desarrollo humano. Así por ejemplo, en muchas regiones del mundo, la demanda actual de los recursos hídricos excede su disponibilidad, por lo que la adecuada gestión de estos sistemas, se convierte en un desafío y en una tarea prioritaria para el desarrollo presente y futuro de todos los Estados.

Hoy en día, uno de los grandes problemas que no permiten una adecuada gestión de los recursos hídricos, es la falta de información disponible en forma sistemática y ordenada. Por ejemplo, al intervenir una cuenca, donde no se dispone de información adecuada, se corre el riesgo de obviar factores capaces de alterar por completo su naturaleza, provocando en algunos casos enormes impactos sociales, pérdidas económicas, conflictos e inclusive pérdidas humanas.

En este contexto y enfrentados a la necesidad de contar con información apropiada para la toma de decisiones, el desarrollo de nuevas herramientas basadas en el funcionamiento de las cuencas, es esencial para mejorar la eficiencia en un modelo de gestión de sus recursos hídricos. Dentro de este nuevo conjunto de herramientas, las Cuencas Virtuales son una representación digital de la red fluvial que incorpora cuantiosa información ambiental de manera espacialmente explicita, a diferentes escalas de detalle y dotada de numerosas capacidades analíticas que ayudan a comprender las interacciones al interior de una cuenca, facilitando de esta forma la toma de decisiones. Es por esto, que las Cuencas Virtuales representan una herramienta valiosa para la investigación del funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce y para la gestión de los recursos hídricos.

El presente estudio desarrolla Cuencas Virtuales dentro del territorio chileno, entre la Región de Arica y Parinacota y la de Los Lagos. El desarrollo de estas, se realizó utilizando el software NETMAP 2017 considerando variables ambientales climáticas, geológicas y de los usos del suelo.

De las Cuencas Virtuales generadas, sus redes fluviales se ajustan espacialmente bien a la realidad de los cauces al comparar con imágenes satelitales; inclusive en algunas zonas, se ajustan mejor que las redes fluviales oficiales de la DGA. Por su parte, las variables ambientales utilizadas presentan un gran potencial de actualización y aumento en la precisión de la representación de las cuencas al utilizar información de mejor calidad. El análisis espacial de las variables ambientales, muestra que la Zona Central de Chile presenta características climáticas menos extremas que las del Sur o las del Norte. Esto permite una mayor diversidad de usos del suelo, desde usos naturales correspondientes a bosques y suelos desnudos (en las partes altas de las cuencas), a usos del suelo puramente antrópicos y relacionados a actividades productivas de gran importancia económica como las explotaciones agrícolas y plantaciones forestales.

PALABRAS CLAVES: Cuencas Virtuales, Gestión integrada de los recursos hídricos, Variables ambientales

[1]Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, gdaza@ing.ucsc.cl

[2]Investigador FONDECYT, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fpenas@ucsc.cl

[3]Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, emunozo@ucsc.cl

ABSTRACT:

The fluvial systems provide us daily with a large number of resources, such as the supply of clean water, the production of food and generation of energy, among many others. Frequently, the preservation of these resources and services are threatened as a consequence of the intervention and overexploitation to which they are subjected, in order to satisfy the needs of human development. For example, in many regions of the world, the current demand for water resources exceeds their availability, so that the proper management of these systems becomes a challenge and a priority task for the present and future development of all States.

Nowadays, one of the big problems that do not allow an adequate management of water resources, is the lack of information available in a systematic and properly manner. For example, when intervening a basin, without having the right information, there is a risk of avoiding factors able to alter completely its nature, causing in some cases enormous social impacts, economic losses, conflicts and even cost human lives.

In this context and faced with the need to have appropriate information for decision making, the development of new tools based on the operation of the basins, is essential to improve efficiency in a model of management of water resources. Within this new set of tools, the Virtual Watershed are a digital representation of the fluvial network that incorporates a large amount of environmental information in a spatially explicit manner, at different scales of detail and endowed with numerous analytical capabilities that help to understand the interactions within of a basin, thus facilitating decision-making. This is why the Virtual Watersheed represents a valuable tool for the investigation of the functioning of freshwater ecosystems and for the management of water resources.

The present study develops Virtual Watershed within the Chilean territory, between the Region of “Arica y Parinacota” and the Region of “Los Lagos”. The development of these was done using the NETMAP 2017 software, considering climatic, geological and land use environmental variables.

Of the generated Virtual Watersheds, their fluvial networks adjust spatially well to the reality of the channels when comparing with satellite images; even in some areas, they fit better than the official river networks of the DGA. On the other hand, the environmental variables used have a great potential to update and increase the accuracy of the representation of the basins when using better quality information. The spatial analysis of the environmental variables shows that the Central Zone of Chile has less extreme climatic characteristics than those of the South or those of the North. This allows a greater diversity of land uses, from natural uses corresponding to forests and bare soils (in the upper parts of the basins), to purely anthropic land uses and related to productive activities of great economic importance such as agricultural operations and plantations forestry.

KEYWORDS: Virtual Watershed, Integrated water resource management, Environmental variables

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas fluviales, como parte integrante de las cuencas hidrográficas, son esenciales para la vida del hombre, para la sustentabilidad ambiental y para el desarrollo y sana convivencia de las sociedades. Estos sistemas proveen de una serie de recursos y servicios ecosistémicos, como el agua potable, agua para saneamiento, producción de alimentos, generación de energía, recreación, entre otros. Los ríos como fuente principal del recurso hídrico y al estar sometido constantemente a estas demandas, son frecuentemente sobreexplotados, convirtiéndolos en uno de los ecosistemas más dañados por el hombre, desde tiempos inmemorables (Naiman et al., 2002).

Paralelamente al escenario anterior, la demanda de agua potable se verá aumentada durante las siguientes décadas, provocando mayor estrés hídrico, daños en los ecosistemas y la alteración del funcionamiento natural de los sistemas fluviales y de los servicios que estos nos proveen (Barquin et al., 2015). Además, producto del cambio climático, se pronostica que se generen diversos efectos sobre la calidad (eutrofización debido a olas de calor) y disponibilidad (deshielo y sequías) del recurso hídrico (IPCC, 2007); por estas razones, el mantener y restaurar ecosistemas dependientes del agua es esencial para asegurar el bienestar y desarrollo humano ahora y en el futuro, siendo un tema cada vez más importante a considerar en las políticas públicas (Postel & Ritcher, 2003).

Para dar respuesta a los problemas anteriores, resulta esencial contar con un moderno y adecuado modelo de gestión, que sea capaz de satisfacer las diversas demandas de cantidad y calidad de agua de manera sustentable. Al respecto, en Chile existe un modelo de gestión privado del agua, en donde el acceso, el uso y la administración del recurso hídrico están regulados por el Código de Aguas (1981); y su Modificación (2005). Este código establece que para usar el agua se debe contar con un derecho de aprovechamiento que se asigna por acto de autoridad, en forma gratuita, a perpetuidad y en función de su disponibilidad. El modelo chileno genera grandes problemas y conflictos, pues se traduce en una gestión fragmentaria, más no integrada a nivel de cuenca, generando beneficios a nivel individual para quien aprovecha los recursos, pero los costos generados en la gestión individual, se reparten socialmente entre los actores pasivos y activos de una cuenca.

La alternativa al modelo chileno de gestión de los recursos hídricos, es la adopción de un modelo de "Gestión Integrada del Agua en las Cuencas Hidrográficas"; la implementación de este modelo, es una tarea compleja que solo puede ser alcanzada mediante la consideración y estudio de una gran cantidad de variables (Petts, 2007), que ayuden a entender como el hombre induce de forma directa (ej: por la construcción de presas), o indirecta (ej: Modificación en los usos del suelo), alteraciones en el flujo normal de cauces, sus ecosistemas y los servicios que proveen (Peñas & Muñoz, 2017). Por ejemplo en Chile, el caudal ecologico corresponde a un 20% del caudal medio mensual, y la metodología usada para determinar dicho caudal se basa en criterios netemaente hidrológicos, careciendo de fundamentos ecológicos (Peredo-Parada et al., 2016). En este sentido, el manejo integrado de cuencas se caracteriza por su enfoque intersectorial e interdisciplinario (ecológico, ambiental, social y económico) apuntando a la gestión de múltiples objetivos (Nakamura, 2003). Para alcanzar estos objetivos es indispensable, entre otras cosas, contar con información completa y de calidad.

Al respecto, la falta de información hidrológica, geomorfológica, de calidad de agua y biológica, es uno de los grandes problemas del manejo integrado en muchas cuencas del mundo (Liu et al., 2008). Por ejemplo, en la zona centro-sur de Chile, la baja densidad en estaciones pluviométricas (1 estación cada 550 kmˆ2 aproximadamente), la mala calibración, la falta de mantenimiento, o la mala distribución de estas, impide medir correctamente el aumento de las precipitaciones debido a la orografía (Muñoz, 2017). Además, la no coincidencia de la información de distinta indole en el espacio, hace compleja la tarea de establecer interrelaciones escenciales para entender distintos procesos en los sistemas fluviales. A su vez, la información de mala calidad es equivalente a no tener información alguna, dificultando de esta forma la toma de decisiones (Liu et al., 2008).

Una forma de suplir estas carencias de información, es mediante nuevas herramientas que permitan describir el funcionamiento e interacciones dentro de una cuenca, y de esta forma, comprender por ejemplo, los efectos de embalses, cambios en usos del suelo y de diversos proyectos que pueden alterar el régimen natural de ríos y las funciones propias de sus ecosistemas (Peñas & Muñoz, 2017). En este sentido las Cuencas Virtuales son una herramienta de simulación geoespacial de sistemas fluviales, que consisten en representaciones numéricas digitales completas y precisas de las redes fluviales, abarcando incluso hasta pequeños ríos y arroyos importantes desde el punto de vista ecológico (Guisan et al., 2007); Las Cuencas Virtuales, también necesitan ser dotadas con capacidades analíticas para apoyar la gestión y conservación de recursos, atribuyendo a cada segmento de la red fluvial, información clave como: características topográficas, descripción climática, discretización de los usos del suelo, para de esta manera, identificar las interacciones entre el hombre y el medio ambiente (Benda et al., 2015).

La importancia de las Cuencas Virtuales radica en la capacidad de relacionar distintos aspectos de cuencas, desde procesos y formas de relieve hasta interacciones humanas dentro de estas (Benda et al., 2015), además de ofrecer ventajas analíticas al incorporar una amplia gama de interacciones terrestres-fluviales a diferentes escalas de detalle (Benda et al., 2015). La utilidad de su aplicabilidad se ha visto en distintos estudios y proyectos a nivel mundial, como por ejemplo: clasificación hidrológica de ríos y predicción de hábitats de peces en Canadá (McCleary & Hassan, 2008,2011); determinar potencial de erosión debido a la deforestación y predicción de aporte sedimentario a ríos en China (Ji et al., 2013,2014); determinar zonas de inundación en Rusia (Benda et al., 2015); predecir hábitats acuáticos y delimitar zonas ribereñas en España (Barquin et al., 2011; Fernández et al., 2012), entre otros.

Por lo expresado anteriormente, este estudio tiene como objetivos: 1) crear las Cuencas Virtuales para todas las cuencas de Chile, desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Lagos; 2) realizar un análisis de los patrones espaciales de las principales variables ambientales a nivel país; realizar un análisis de los patrones espaciales de las mismas variables ambientales a nivel intra-cuenca en la zona Central del país, segregando las cuencas en partes bajas, partes medias y partes altas; 4) describir como estas variables pueden afectar al recurso hídrico.

El presente estudio de Cuencas Virtuales y variabilidad espacial, forma parte de otro estudio de mayor envergadura que tiene como objetivo evaluar la alteración hidrológica de los ríos del centro-sur de Chile (Peñas & Muñoz, 2017); este estudio pretende estimar como la alteración hidrológica producida por embalses y cambios en los usos del suelo afecta a los ecosistemas fluviales, con el fin último de generar herramientas útiles para apoyar la gestión de los recursos hídricos y mejorar el conocimiento para el desarrollo de futuras políticas de agua. En este sentido, utilizando las Cuencas Virtuales desarrolladas en este estudio y relacionando sus distintas características ambientales (ej: climatología, geología o usos del suelo) con índices hidrológicos (IH) calculados a partir de series históricas de caudales, se puede predecir el régimen natural a toda la red hidrográfica y de esta forma evaluar la alteración hidrológica.

Los principios ambientales básicos que permiten que los sistemas fluviales funcionen y presten sus servicios aún no se entienden completamente (Naiman et al., 2002), por lo que estudiar cómo cambian distintas variables ambientales a nivel país o dentro de una misma zona es importante, pues nos dan una mejor idea de cómo se relacionan distintas características que afectan de una u otra forma el desarrollo humano.

Área de estudio

El presente estudio, abarca el territorio de Chile continental desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Lagos. Chile es un país de Sudamérica que limita al norte con Perú, al Este con Bolivia y Argentina y al Sur y Oeste con el Océano Pacifico. La geomorfología de Chile continental, determinada principalmente por la actividad volcánica, divide el país de Este a Oeste en tres zonas: Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes. También se puede dividir en cinco regiones geográficas de Norte a Sur: Norte Grande, Norte Chico, Zona Central, Zona Sur y Zona Austral. Los ríos en Chile, se

desarrollan de Este a Oeste desde las Cumbres Andinas hasta la desembocadura en el Océano Pacífico. En la zona norte, debido a la presencia del desierto, existen solo cortas quebradas generando la aparición de cuencas endorreicas, a excepción de la cuenca del Río Loa.

Chile es un país de una variabilidad extrema debido a lo largo de su territorio, si se compara la zona Norte con la zona Sur del país, se pueden identificar a simple vista grandes diferencias, por ejemplo, el gran contraste en el clima, entre el desierto más árido y seco del mundo en la zona de Atacama y los campos de hielo en la zona Austral. También, se aprecian importantes diferencias en las actividades económicas, desde un Norte principalmente minero, cambiando hacia el Centro-Sur del país, dominado por actividades principalmente agrícolas y forestales. Esta realidad, incide, en buena medida, en el centralismo poblacional y administrativo del país.

La zona de estudio (Figura 1) contempla las 78 cuencas existentes dentro de las fronteras de Chile. Estas cuencas son las delimitadas según la base de datos oficial de la Dirección General de Aguas.

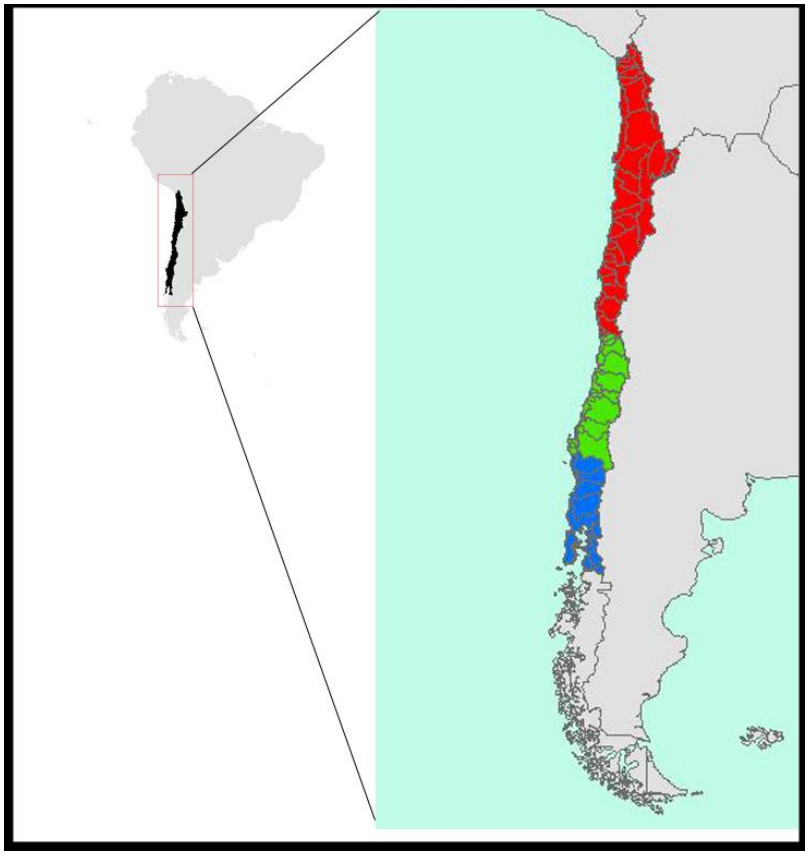


Figura 1: Zona de estudio, Cuencas de Chile entre la XV Región de Arica y Parinacota y la X Región de Los Lagos (rojo: Zona Norte; verde: Zona Central; azul: Zona Sur).

2. MÉTODOS

2.1 Recopilación, reclasificación y edición de información

Como se ha comentado anteriormente, las Cuencas Virtuales desarrolladas en este estudio, son parte importante de otro estudio de mayor envergadura (Peñas & Muñoz, 2017) que busca evaluar la alteración hidrológica en los ríos del centro-sur de Chile. Por esta razón, este estudio busca dotar a estas Cuencas Virtuales con información de variables ambientales que influyen y son importantes en la respuesta hidrológica de estos ríos. Dentro de estas

variables se consideraron variables topográficas, climáticas, geológicas y de los usos del suelo. No obstante, es importante mencionar que estas cuencas virtuales pueden adquirir mucha más información en caso de ser necesario de acuerdo a otros objetivos.

Las Cuencas Virtuales se desarrollaron utilizando la plataforma de modelado Netmap (v2017; (Benda et al., 2007)). Sin embargo, como paso previo a la generación de las mismas, se recopiló la información necesaria. Para determinar el camino que seguirán las redes fluviales, y calcular las variables topográficas de cada cuenca (Tabla 1 y Tabla 2), se necesita de Modelos de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés; Tarboton, 1997). Se recopilaron DEM's con una resolución de 12.5 metros de la zona de estudio de la Alaska Satellite Facility, NASA (ASF DAAC, 2011, ALOS-1 PALSAR Radiometric Terrain Corrected high_res), que corresponden a los de mayor resolución disponible gratuitamente en Chile, siendo de 30 metros los de mayor precisión después de estos. Se buscaron los DEM's de mejor resolución. Peñas et al., (2011) Pusieron de manifiesto que la resolución del DEM juega un papel importante en el grado de representatividad y precisión de la red.

Además, se recopiló la delimitación oficial de cuencas de Chile y la red hídrica nacional establecida por la Dirección General de Aguas (DGA). La delimitación oficial de cuencas fue utilizada para generar máscaras de trabajo para cada una de las cuencas, mientras que las redes hídricas oficiales, se utilizaron para generar archivos que asisten al software a trazar las redes en zonas de baja pendiente o planicies, pues es donde éste tiene mayor dificultad de cálculo. Posteriormente, estas redes oficiales, se utilizaron a modo de referencia inicial, para comparar con las redes fluviales trazadas por el software.

Tabla 1: Información ambiental de partida para el desarrollo de cuencas virtuales en Chile (Res.: Resolución (m); Esc.: Escala)

Información	**Descripción**	**Formato**	**Fuente**	**Fecha act.**	**Res. /Esc.**
Topográfica	Modelos digitales de elevación	Raster	NASA, ASF	2011	12.5x12.5
Geológica	Mapa geológico de Chile	Vector Shp	SERNAMEGOMIN	2003	1:1.000.000
Usos del suelos	Catastro usos del suelos por región	Vector Shp	CONAF	1997-2015	Varias
Climática	Precipitación anual y temperatura	Raster	CHELSA	2017	1000x1000

La información geológica, se obtuvo del mapa geológico digital, de escala de 1:1.000.000 creado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), con una base de datos actualizada por última vez el año 2003. Esta información, debió ser reclasificada, desde una clasificación inicial de los distintos tipos de geología en Chile, a dos nuevas categorías: Dureza (resistencia a la erosión del suelo) y Permeabilidad (capacidad para que el agua infiltre o fluya por el suelo) en una escala de 1 a 5, en donde 1 representa menor dureza y permeabilidad del suelo y 5 mayor dureza y permeabilidad (Snelder et al., 2008).

La información de los usos de suelos fue obtenida de la base de datos disponible de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Esta información, se encontraba disponible por Región, con diferentes años de antigüedad (desde 1997 a 2015), a diferentes escalas (1:200.000; 1:40.000) y con distintas clasificaciones originales (entre 20 y 50 clasificaciones), por lo que al igual que la información geológica, debió ser reclasificada. Esta reclasificación, se hizo en base a 11 nuevas categorías de los usos del suelo: Agrícola, Bosque Nativo, Bosque de Coníferas, Suelos Desnudos, Glaciar, Humedal, Pastizal, Plantación, Matorral, Suelo Urbano-Industrial y Cuerpo de Agua. Sin embargo, para el posterior análisis espacial, solo se usaron los usos de suelos relevantes (Tabla 2) ya que la poca presencia de algunos tipos de usos en Chile, permitían obviar su inclusión en este análisis.

Finalmente, para la obtención de la información de variables climáticas de precipitación anual y temperatura media se utilizaron las bases de datos desarrolladas por la Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (Karger et al., 2016). Los datos de temperatura basan su algoritmo predictivo en la

reducción estadística de temperaturas atmosféricas. La información de precipitaciones, incluye en su algoritmo predictores orográficos tales como campos de viento, exposición solar y altura de la capa limite atmosférica (Karger et al., 2017).

Tabla 2: Variables ambientales utilizadas en el análisis espacial (CL: climáticas; TP: topográficas; US: usos del suelo; GL: geológicas) (MN: Promedio área portante cuenca; LC: promedio sub-área portante cuenca; BF: 200 metros desde la red hacia cualquier lado; VT: valor de tramo)

Variables	**Tipo**	**Unidad**	**Descripción**	**Forma info.**
Precipitación	CL	mm	Precipitación Anual	MN;LC;BF
Temperatura	CL	C°	Temperatura media anual	MN;LC;BF
Área portante	TP	km^2	Área cuenca	VT
Elevación	TP	m	Elevación promedio tramo	VT
Pendiente	TP			VT
Sinuosidad	TP			VT
Densidad red	TP	km/km^2	km de red por área	VT
Agrícola	US	%	Superficie Agrícola	MN;LC;BF
Bosque Nativo	US	%	Superficie Bosques Nativos	MN;LC;BF
Desnudos	US	%	Superficie Suelos Desnudos	MN;LC;BF
Plantaciones	US	%	Superficie Plantaciones	MN;LC;BF
Matorrales	US	%	Superficie Matorrales	MN;LC;BF
Permeabilidad	GL	-	Permeabilidad del terreno	MN;LC;BF
Dureza	GL	-	Dureza del terreno	MN;LC;BF

La información descrita anteriormente debía estar en un formato único de acuerdo a las especificaciones de Netmap. Por esto, los archivos tipo shapefile como la información geológica y de usos del suelos, debió ser transformados a archivos tipo raster (Polygon to raster). Además, todos los archivos raster, debieron ser modificados en su resolución (Resample) a una que equiparase el raster de mejor resolución encontrado, en este caso el raster del DEM (12.5x12.5 metros). Todas estas tareas fueron realizadas mediante un software tipo GIS (sistema de información geográfica, Arcmap 10.2.2).

Toda la información utilizada fue proyectada antes de ser utilizada en el datum WGS 1984, zona 19 Sur, que es donde se encuentra Chile.

Finalmente, al contar con toda la información procesada y reclasificada de las variables ambientales, se procedió a la extracción de esta información mediante el uso de máscaras para cada una de las cuencas en la zona de estudio para comenzar con el cálculo de las nuevas redes hídricas con Netmap.

2.2 Desarrollo de cuencas virtuales

Las Cuencas Virtuales están constituidas por las redes fluviales extraídas del DEM y una serie de atributos ambientales calculados para cada uno de los segmentos que conforman dichas redes. Además, estos atributos son calculados a diferentes escalas espaciales: escala de cuenca (MN: considerando toda la cuenca vertiente aguas arriba de cada segmento), local (LC: la subcuenca asociada a cada segmento concreto) y buffer (BF: 200 m

adyacentes a un determinado segmento; Tabla 2). Netmap permite definir una serie de parámetros de cálculo de acuerdo con las necesidades del usuario y los objetivos del estudio, como son la densidad de la red o el largo del tramo en que se divide el sistema fluvial. Por otro lado, en el caso de este estudio, se dotaron a las redes fluviales con atributos ambientales adquiridos desde las capas descritas en la sección 2.1, como por ejemplo: área portante de la cuenca, pendiente, elevación promedio, sinuosidad y densidad de red; valores de precipitación anual y temperatura media anual; proporción del tipo de uso de suelo dentro del área portante de la cuenca; permeabilidad y resistencia del suelo (Tabla 2).

2.2.1 Creación de redes hídricas

Netmap deriva las redes fluviales a partir de los DEM's, y en zonas de baja pendiente o planicies, utiliza información de apoyo como la red hidrológica oficial. Netmap permite cambiar la extensión aguas arriba de las redes creadas, la densidad de las redes, el área de drenaje para el cual se dibuja un tramo de red, y el largo de los tramos para los que calcula características el programa, teniendo como largo mínimo de tramo de red el de la resolución del DEM utilizado (Miller, 2002).

Netmap crea una red de nodos antes de generar las redes, basándose en varios parámetros definidos por el usuario (Tabla 3) que dependen de las características topográficas de las cuencas en estudio. Estos parámetros corresponden al área crítica de drenaje, curvatura del plano y longitud crítica de tramo. El área crítica (AS^2; Área por pendiente al cuadrado) corresponde al área por tramo de red; Netmap permite establecer valores de área crítica diferentes atendiendo a la pendiente de cada zona. La curvatura del plano es la curvatura de una celda en relación a sus ocho celdas vecinas, se define para zonas de alto y bajo gradiente, y determina la convergencia o divergencia del flujo de cada celda del DEM. Longitud crítica del tramo corresponde al largo mínimo que debe tener un tramo de red (Terrainworks, 2015).

Usando los umbrales de estos parámetros se ajustó (mediante proceso iterativo de calibración) la densidad y la extensión de las redes creadas para las cuencas de Chile.

Tabla 3: Parámetros de calibración utilizados Netmap

Parámetro	**Valor**
Área crítica de drenaje zonas bajo gradiente	15000
Área crítica de drenaje zonas alto gradiente	60000
Curvatura de plano zonas bajo gradiente	0.01
Curvatura de plano zonas alto gradiente	0.25
Longitud mínima de tramos de cabecera	20
Longitud mínima de tramo (metros)	500

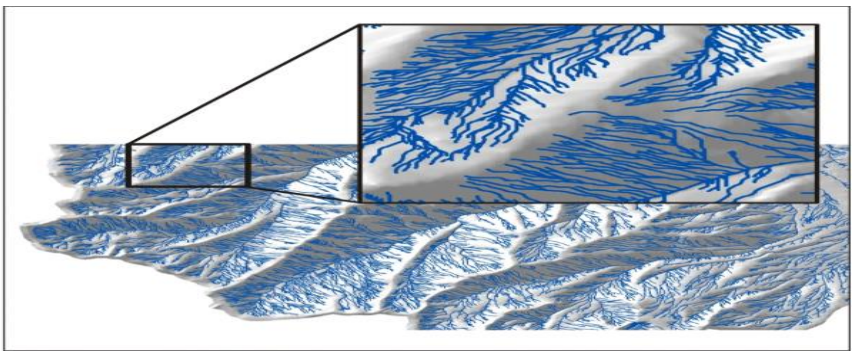


Figura 2: Ejemplo de red derivada del DEM demasiado densa (efecto pluma de gallina) producto de una mala selección de parámetros (Fuente Terrainworks)

2.2.2 Inspección de redes sintéticas versus redes oficiales DGA

Posterior al cálculo de las redes, se procedió a comparar con la red oficial de la DGA (Figura 3) y verificar mediante imagen satelital que estas siguieran un correcto trazado en sus cauces.

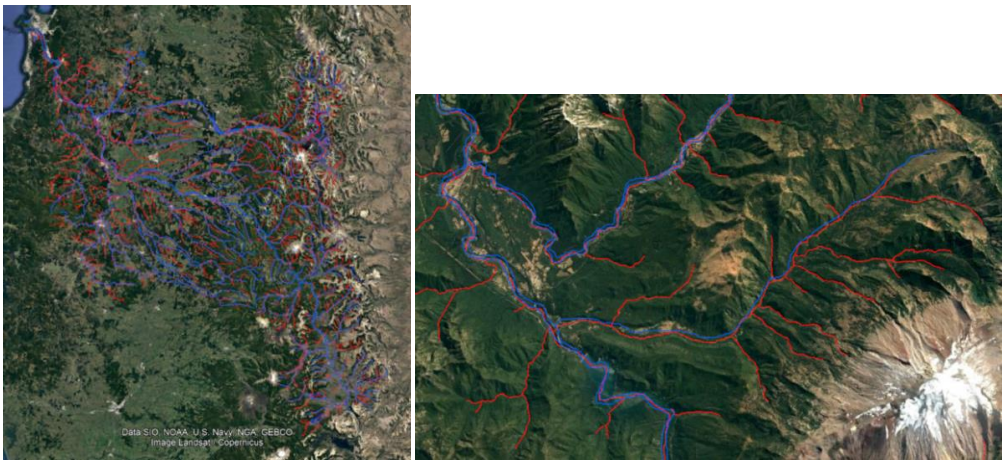


Figura 3: Comparación entre red oficial DGA (azul) y red sintética Netmap (rojo) (Imagen modificada desde Google Earth).

2.2.3 Inclusión de variables ambientales climáticas, geológicas y de usos del suelo

Finalmente, se agregaron a estas redes ya con sus características topográficas (calculadas a partir del DEM), variables derivadas de la información climática, geológica y de usos del suelo para cada uno de sus tramos a partir de una extensión del programa Netmap (Tabla 2). Una vez la red fluvial cuenta con estas características, se tiene la capacidad de observar por ejemplo, como estas variables, van cambiando a lo largo de una cuenca (Figura 4), o identificar las zonas dentro de una cuenca bajo un determinado rango de valores de estas variables ambientales.

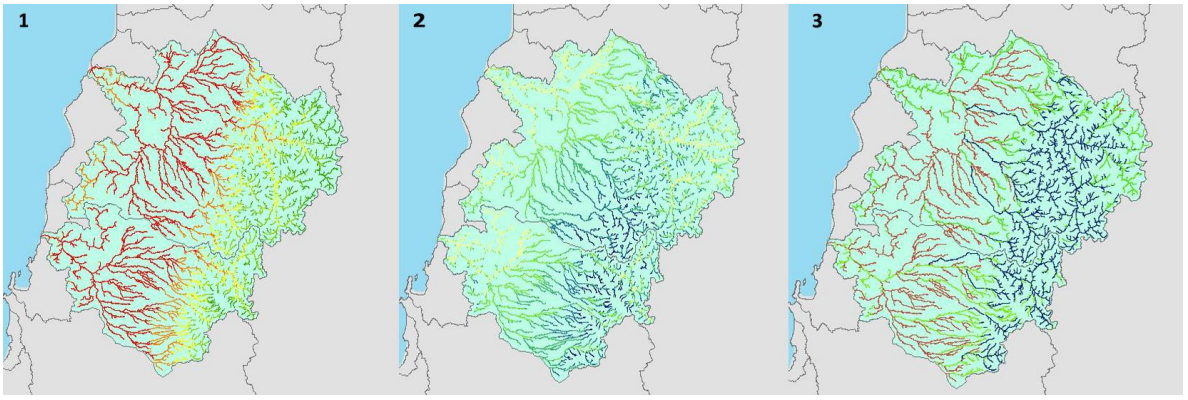


Figura 4: Cuencas Virtuales de Maule e Itata (1. Temperatura media anual en las cuencas, rojo mayores temperaturas, amarillo temperaturas intermedias, verde menores temperaturas; 2. Precipitaciones anuales en las cuencas, amarillo menores precipitaciones, verde precipitaciones intermedia, azul mayores precipitaciones; 3. Pendiente en las cuencas, marrón pendientes bajas; verde pendientes medias; azul pendientes altas)

2.3 Análisis espacial de variables ambientales

Se llevó a cabo un análisis de los patrones espaciales de las variables ambientales a dos escalas de detalles. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis a escala nacional para observar como varían las distintas variables entre las diferentes cuencas de la Zona Norte, Zona Central y Zona Sur. En segundo lugar, se llevó a cabo un análisis espacial intracuenca en la Zona Central para observar como variaban las características ambientales de las cuencas desde el nacimiento, hasta la desembocadura.

2.3.1 Análisis espacial a nivel nacional

Se realizó el análisis espacial de las variables ambientales a nivel país, dividiéndolo en tres zonas: Zona Norte, juntando las zonas geográficas del Norte Grande y Norte Chico, analizando en esta zona las grandes cuencas de los ríos: Choapa, Limari, Elqui, Huasco, Copiapo, Salado, Caracol y Loa; Zona Central, en donde se analizaron las grandes Cuencas de los ríos: Biobío, Itata, Maule, Mataquito, Rapel, Maipo y Aconcagua; y Zona Sur, desde la región de la Araucanía hasta la región de Los Lagos en donde se analizaron las grandes Cuencas de los ríos: Imperial, Tolten, Valdivia, Bueno y Costera entre el río Bueno y Puelo. El análisis espacial se realizó obre las variables climáticas, geológicas y de usos del suelo utilizando el último tramo de cada cuenca, pues este tramo es el que engloba la información de la cuenca considerando la totalidad de su área portante (MN, Tabla 2). Sin embargo, las características topográficas como la sinuosidad o pendiente, al representar solo las características asociadas al tramo en cuestión, debieron ser promediadas utilizando los valores de todos los tramos para cada una de las Cuencas Virtuales. Una vez se contaba con la información representativa del total del área portante de cada una de las cuencas, se calcularon valores promedios y de desviación estándar, con los cuales se realizaron "Diagramas de Caja" para cada una de las zonas, considerando cada una de las variables ambientales. Estos gráficos fueron utilizados para visualizar la distribución de los datos y describir las diferencias y características de cada zona.

2.3.2 Análisis espacial intracuenca en la Zona Central

El análisis espacial de variables ambientales a escala intracuenca, se realizó en las cuencas de la Zona Central descrita en la sección anterior, debido a su mayor variabilidad y potencial de análisis en relación a la zona Norte y zona Sur. Este análisis se realizó a distinto nivel de detalle, en donde cada cuenca de la zona Central se subdividió en tres zonas, correspondientes a la cuenca baja, cuenca media y cuenca alta. La segregación de las cuencas de la Zona Central, fue realizada mediante inspección visual de imágenes satelitales, y contrastándolas con información topográfica de las cuencas virtuales, como cambios de pendiente o de elevación (Figura 5). Finalmente, se realizaron los mismos cálculos y gráficos del análisis nacional, a modo de describir las diferencias y características de las cuencas bajas, medias y altas en la zona central.

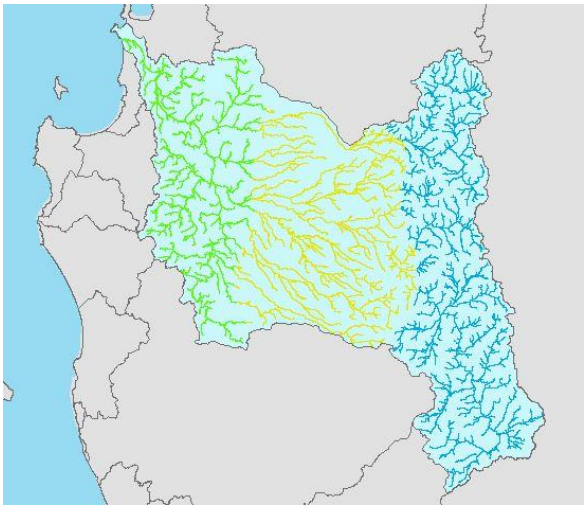


Figura 5: Ejemplo de división de la Cuenca Virtual del Biobío para análisis Zona Central (verde: cuenca baja; amarillo: cuenca media; azul: cuenca alta)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de características de las redes

Del análisis comparativo entre la configuración espacial de las redes fluviales de las Cuencas Virtuales y las redes oficiales DGA, se pudo notar que las cuencas virtuales presentan, por lo general, redes con mayor densidad que las redes oficiales, habiendo calculado del DEM incluso quebradas y ríos en su nacimiento, que no estaban tabulados en la red oficial y que sí se podían apreciar en las imágenes satelitales. Estos ríos de orden bajo de Strahler en el nacimiento de las cuencas, son sumamente importantes para el análisis, por la influencia que tienen sobre el resto de la cuenca aguas abajo e incluso en las aguas subterráneas (ej: transporte de contaminantes o la creación de mini centrales hidroeléctricas de paso comunes en estas partes de cuencas que pueden cambiar el régimen hidrológico del río; Alexander et al., 2007; Peñas & Muñoz, 2017). El aumento en la densidad de las redes, se acentuaba en la Zona del Norte de Chile, en donde las redes oficiales son poco densas debido a la presencia del desierto y existe poca o nula escorrentía superficial, lo que dificulta su trazado. Además cabe destacar, que la inclusión de ríos y arroyos de orden bajo, siempre es importante, debido a que componen gran parte la red fluvial de cualquier cuenca, y desde el punto de vista ecológico, los ríos de cabecera u orden bajo, tienen gran influencia sobre la red de drenaje aguas abajo (Alexander et al., 2007).

Es importante tener presente, que se pueden llevar a cabo estudios posteriores entre la diferencia de las redes generadas a partir del DEM utilizado y otros DEM's de diferentes características (ej: menor resolución). Esto permitiría analizar la calidad de la información del primero, puesto que aún hay pocos estudios de la diferencia de calidad aportada por distintos DEM's y su efecto sobre distintas características topográficas importantes (ej: pendiente, densidad de la red; Peñas et al. 2011).

Por otro lado, el análisis comparativo del ajuste del trazado entre la red oficial y las redes de las Cuencas Virtuales, ha puesto de manifiesto dos situaciones. Primero, había zonas en las que la red fluvial de las cuencas virtuales se adecuaba mejor que la red oficial respecto a las imágenes satelitales. Esto ocurría especialmente, en zonas altamente influenciadas por la dinámica fluvial de algunos ríos meandriformes, donde los tramos pueden estar sometidos a desplazamientos significativos a lo largo de los años, en comparación al año en que se dibujaron las redes oficiales, o simplemente fueron mal trazadas. Por otro lado, en zonas de baja pendiente o planicies, se han detectado problemas de ubicación de algunos cauces, respecto a su imagen satelital. Es importante destacar, que en este caso, las redes fluviales de las cuencas virtuales derivadas con Netmap, son fácilmente editables en su posición mediante el uso de algún software tipo GIS.

Paralelamente, Netmap tiene gran capacidad de actualizar toda la información generada. Por ejemplo, en el caso de la información geológica y de usos del suelo, debido a que la primera correspondía a una carta geológica digitalizada del año 2003, y la segunda, presentaba diferencias notables de años entre regiones (entre 1997 y 2015), puede ser fácilmente actualizada, en caso de contar con información más precisa. De igual forma, el agregar nueva información para dotar a las cuencas (Ej: evapotranspiración, variables sociales o económicas, etc), no representa mayor dificultad.

3.2 Análisis de variables ambientales a nivel nacional

Climáticas

El análisis de la variabilidad a escala nacional de las variables climáticas ha puesto de manifiesto que, como era de esperar, las precipitaciones van en aumento progresivo desde el Norte desértico hasta el Sur Austral (Figura 6.1). En cambio, las temperaturas mantienen un leve descenso desde el Norte hacia el Sur de Chile (Figura 6.2), sin embargo, en todas las zonas se aprecian temperaturas relativamente bajas, producto de la influencia de las

temperaturas de la Cordillera de los Andes en los resultados de temperatura media de las cuencas. También, de los resultados de temperatura, ocurren peculiaridades en la zona Norte en cuencas como la de Huasco y Elqui, las que disminuyen el rango de las temperaturas; esto debido principalmente a inversiones térmicas bruscas que ocurren en la zona (Fiebig-Wittmaack et al., 2008). Las bajas precipitaciones en la zona Norte, dan cuenta de la poca disponibilidad del recurso hídrico en los cauces de esta zona, en contraste, las altas precipitaciones en la zona centro-sur del país proveen una mayor cantidad del recurso hídrico.

Respecto a la escasa disponibilidad del recurso hídrico en la zona Norte, se considera como una de las principales causas de su baja población (11,78% según el Censo del 2002); a su vez, en la zona Sur, debido a condiciones climáticas tan extremas y contrarias a la zona Norte, ocurre el mismo fenómeno de despoblación (14.46% según el Censo 2002), provocando la concentración de la mayoría de los habitantes y de las actividades económicas de Chile en la zona Central.

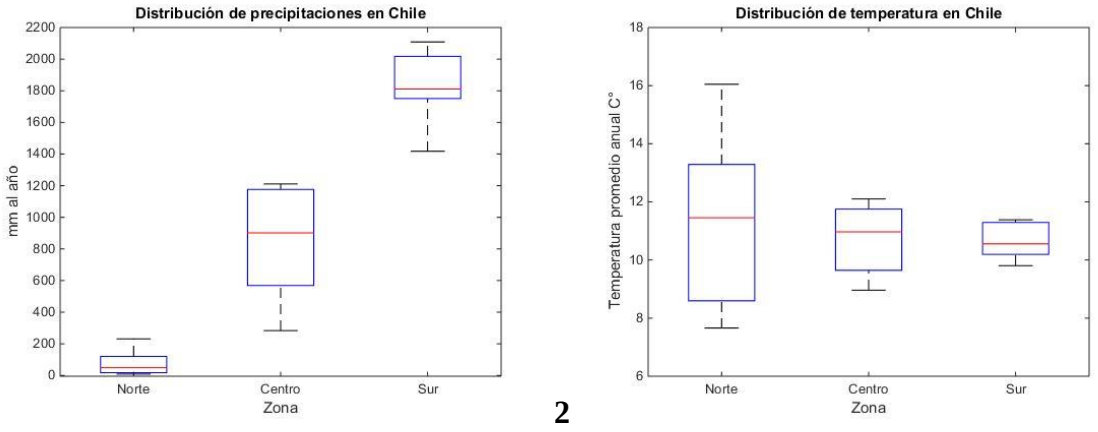


Figura 6: Comparación de la distribución de variables climáticas en la zonas Norte, Centro y Sur de Chile. 1 Precipitación; 2 Temperatura (En los gráficos:la parte baja de la caja representa el 25% de la muestra; la parte alta de la caja representa el 75% de la muestra; la línea roja representa el 50% de la muestra, aprox. Media; los bigotes representan el 0 y 100% de la muestra)

Usos del suelo

En la zona norte del país predominan los suelos desnudos y suelos cubiertos por matorrales característicos de la zona desertica (Figura 7); la ausencia de prácticas como la agricultura, o la explotación forestal, obedece principalmente a la escasez de los recursos hídricos y el clima, transformando a la minería y la pesca, en las principales actividades económicas en esta zona del país. Por otro lado, en la zona Central predominan usos del suelo asociados a actividades económicas importantes como son la agricultura, las plantaciones y la industria forestal. En el Sur del país, al igual que en la zona Centro, se presencian usos del suelo agrícola y de plantación, estas actividades, junto con la pesca, son las principal fuente económica dentro de la zona Sur. Tambien se ve un aumento en la cantidad del Bosque Nativo a lo largo de Chile, desde no haber en la zona Norte, hasta un 60% de ocupación en la zona Sur, producto de las condiciones climáticas de cada zona.

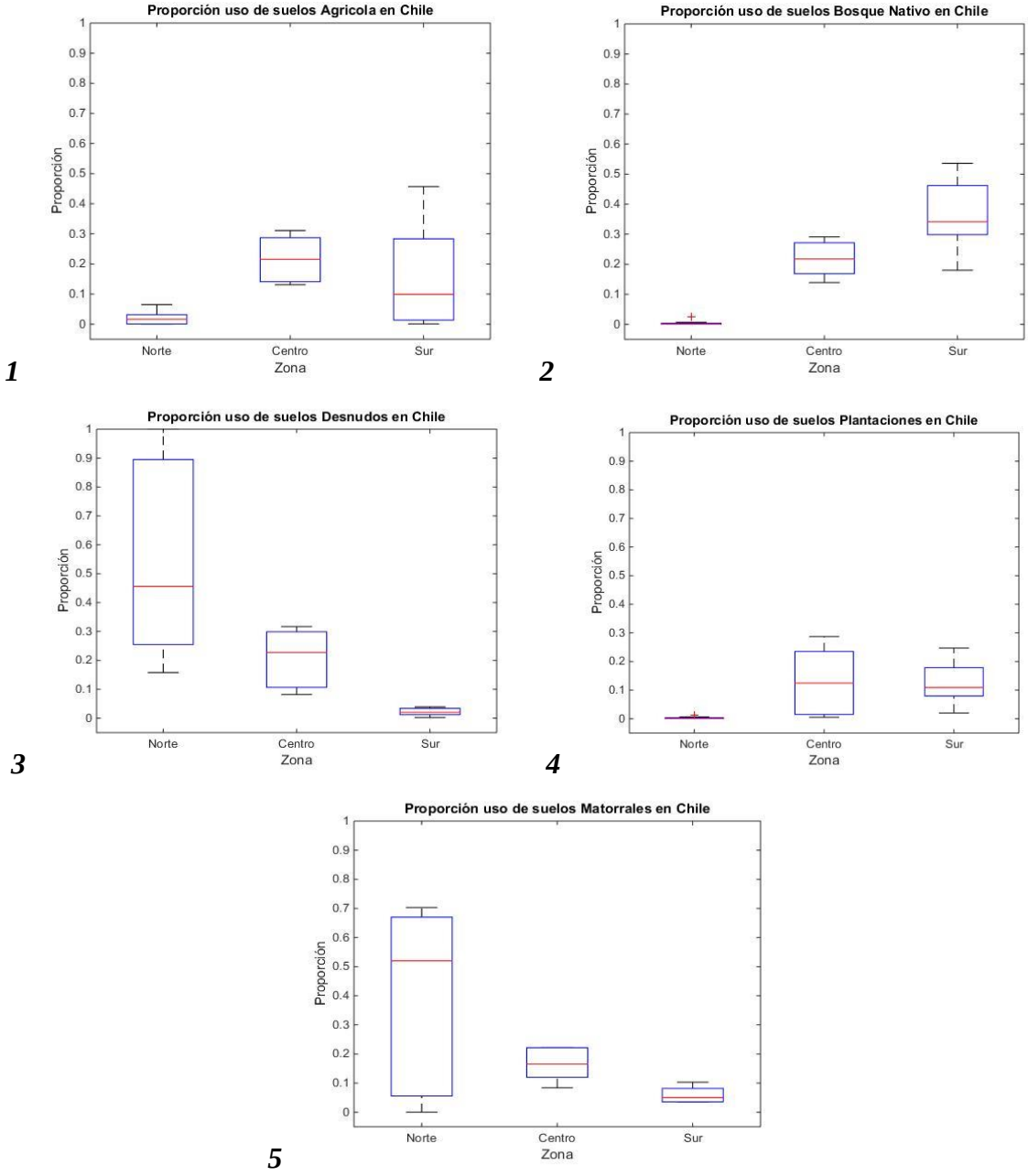
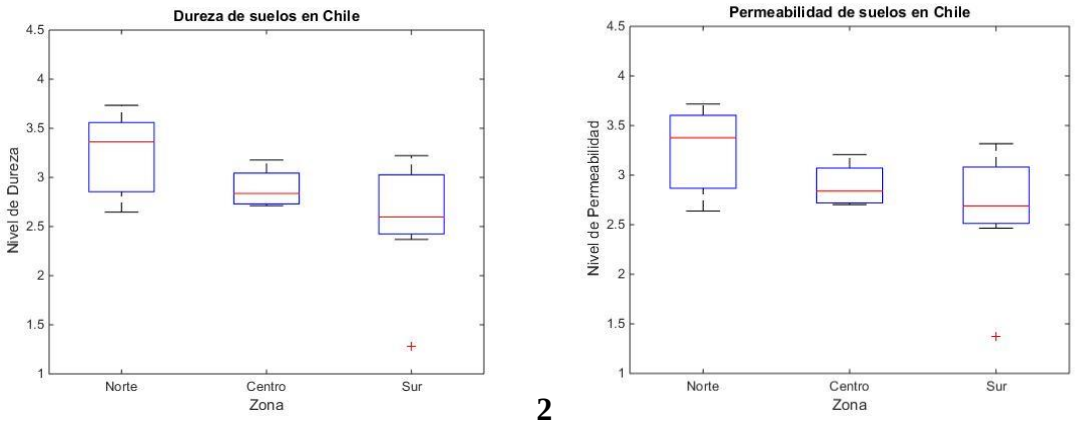


Figura 7: Comparación de la distribución de las variables de los usos del suelo en la zona Norte, Centro y Sur de Chile. 1 Proporción suelos Agricola; 2 Proporción suelos Bosque Nativo; 3 Proporción suelos Desnudos; 4 Proporción suelos de Plantación; 5 Proporción suelos cubiertos de Matorrales

Geológicas

La permeabilidad y dureza de los suelos disminuyen en forma leve desde la zona Norte hacia la zona Sur del país (Figura 8). En el Norte los suelos son mayoritariamente arenas o de material grueso, debido a la escasa erosión producto de su dureza y a las bajas precipitaciones. Además, debido a la alta permeabilidad de los suelos del Norte, el agua de ríos de la Cordillera que no llega a evaporarse, se infiltra fácilmente hacia las napas subterráneas. Por otro lado, al avanzar hacia el Sur, disminuye levemente la dureza de los suelos, debido en parte a la mayor cantidad de suelos aluviales formados por la erosión producto de la mayor cantidad de precipitaciones, estos suelos son más impermeables o de menor capacidad de infiltración. Sin embargo, a pesar

de lo anterior, hay que tener presente que para tener una mejor idea de cómo la dureza y permeabilidad del suelo afectan a los sistemas fluviales, estas variables deberían ser analizadas junto a otras, como por ejemplo, la cobertura vegetal, el nivel freático de los suelos, o pendientes de una cuenca.



1 **2**

Figura 8: Comparación de la distribución de variables geológicas en la zona Norte, Centro y Sur de Chile. 1 Dureza; 2 Permeabilidad

Topográficas

Del análisis de las variables topográficas calculadas a partir del DEM, muestran un aumento progresivo en la densidad de drenaje desde la zona Norte hacia el Centro-Sur del país (Figura 9.1); este incremento se atribuye a la mayor demarcación de cauces producto de eventos erosivos debido a la mayor cantidad de precipitaciones.

Por otro parte, al analizar la sinuosidad y pendiente de cauces (Figura 9), se puede determinar por ejemplo, que en la zona sur, la mayor sinuosidad de los ríos, son consecuencia directa de la disminución de pendientes, puesto que estos, al tener menor pendiente, disminuyen su capacidad de erosión debido a la disminución de las velocidades del flujo, generando de esta forma tramos con mayores curvaturas, en contraste a cauces encajonados y rectos característicos de las pendientes altas.

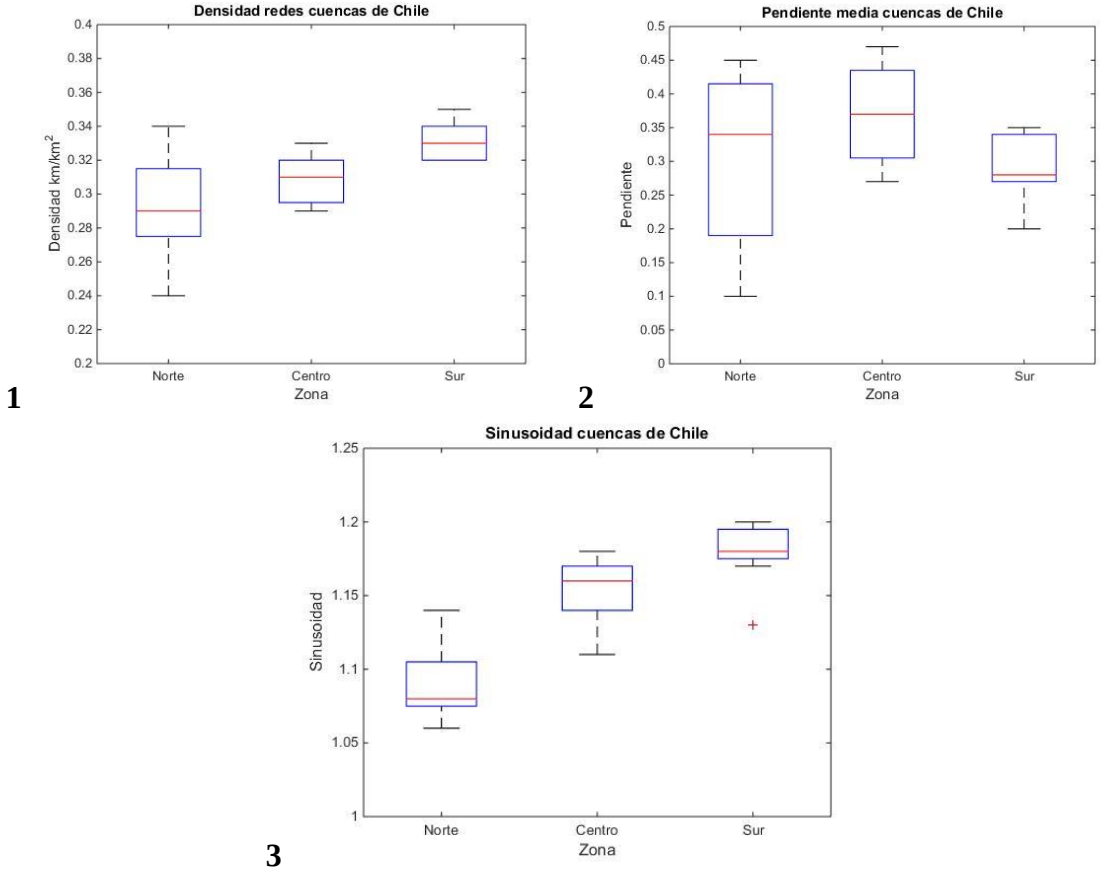
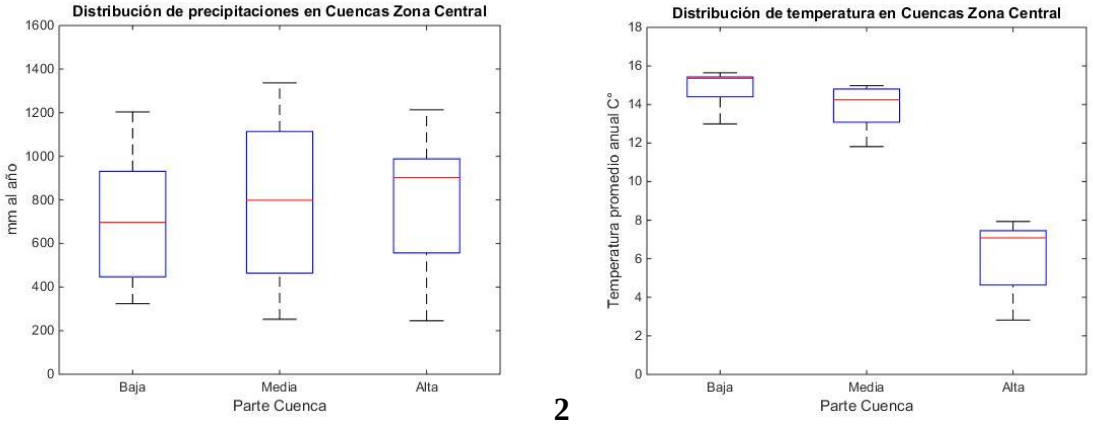


Figura 9: Comparación de la distribución de variables topográficas en la zona Norte, Centro y Sur de Chile. 1 Densidad de Red; 2 Gradiente; 3 Sinusoidad

3.3 Análisis intracuenca de variables ambientales en la Zona Central

Climáticas

En las zona central, en promedio las lluvias van en aumento progresivo (Figura 10.1) desde la parte baja hasta la parte media de las cuencas debido a la orografía (Muñoz, 2017), que consiste en que las masas de aire húmedo, al aumentar su altitud, se enfrían condensando el agua y generando precipitaciones. Sin embargo, existe un estancamiento en el aumento de las precipitaciones de agua lluvia desde las cuencas medias a las cuencas altas, producto de la transformación de la precipitación en forma de lluvia, a precipitaciones en forma de nieve; este fenómeno se origina a raíz de que el aumento en la altitud de las cuencas, hace que las masas de aire sobrepasen la isoterma 0. Además, las temperaturas disminuyen desde la parte baja de las cuencas hacia las partes altas (Figura 10.2), debido al mismo fenómeno de enfriamiento de las masas de aire con la altitud.



1 **2**

Figura 10: Comparación de la distribución de variables climáticas en la zonas Central. 1 Precipitación; 2 Temperatura

Usos del suelo

Del análisis espacial de los usos del suelo en la Zona Central (figura 11), se puede apreciar que actividades como la agricultura y plantaciones forestales, tienen una mayor presencia en las cuencas bajas y medias; estas actividades son predominantes en la zona, por las características más favorables del clima, las características de los suelos para su desarrollo y la disponibilidad del recurso hídrico. Por otra parte, en las partes altas de las cuencas de la Zona Central, la agricultura y plantaciones forestales disminuyen drásticamente (prácticamente desapareciendo), aumentando la presencia de suelos desnudos, lo que sumado a las altas precipitaciones en estas partes de las cuencas, produce un mayor potencial erosivo de los suelos de la alta montaña. Por otro lado, la presencia de bosques nativos es bastante homogénea en todas las partes de las cuencas (bajas, medias y altas), sin embargo, ocurren casos en los que se alcanza incluso un 60 % de ocupación, dando cuenta de la conservación de estos bosques.

En el caso particular de la actividad agrícola, ésta aumenta en la zona media de las cuencas, llegando a alcanzar inclusive un 60 % de ocupación del territorio. A su vez, en la Zona Central, la agricultura de riego representa un 73 % de la demanda de agua (Política Nacional para los Recursos Hídricos, 2015), lo que genera fuerte presión sobre los recursos hídricos.

Por su parte, las plantaciones forestales, provocan alteraciones en el ciclo hidrológico, debido al aumento de la intercepción y de la evapotranspiración, además de reducir la tasa de infiltración; por otro lado, estos tipos de plantaciones, son capaces de extraer agua a mayores profundidades del suelo, en comparación a suelos cubiertos por pastizales o matorrales (Huber & Trecaman, 2002). En cambio, los suelos cubiertos por bosque nativo, tienen una mayor cantidad de retención, que los suelos ocupados por plantaciones forestales, lo que se traduce en una mayor recarga de caudal en cauces superficiales en época estival (Lara et al., 2009).

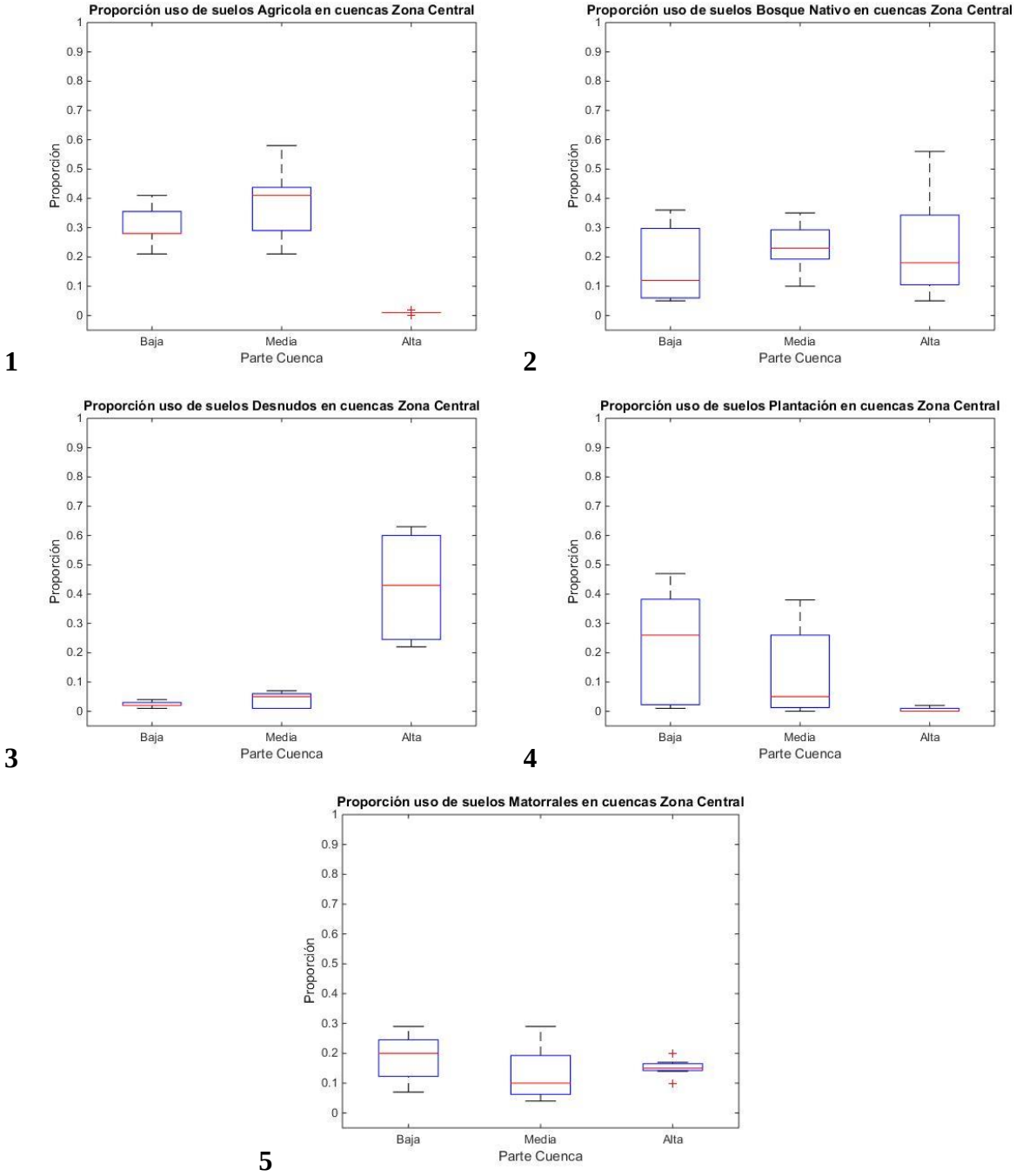
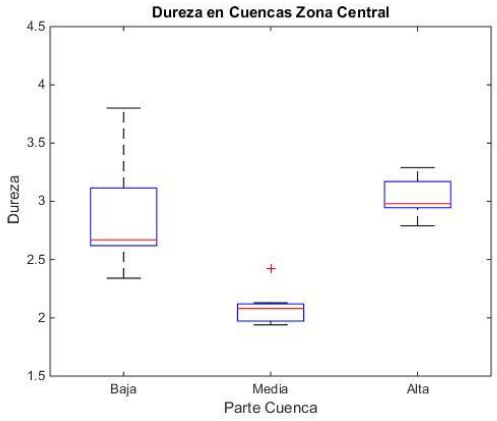


Figura 11: Comparación de la distribución de las variables de los usos del suelo en la zona Central de Chile. 1 Proporción suelos Agricola; 2 Proporción suelos Bosque Nativo; 3 Proporción suelos Desnudos; 4 Proporción suelos de Plantación; 5 Proporción suelos cubiertos de Matorrales

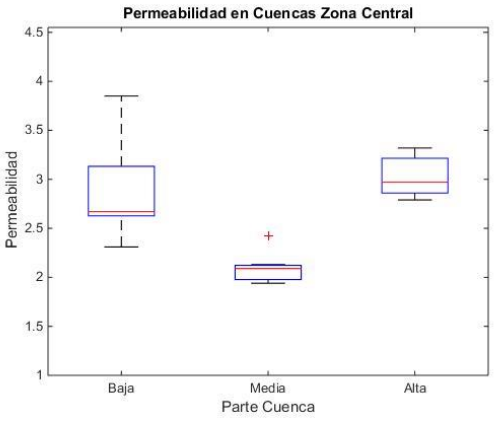
Geológicas

En las zonas altas y bajas de las cuencas de la Zona Central, la dureza y permeabilidad, son similares y mayores a las de las zonas medias (Figura 12); esto se debe, por un lado, a que desde el punto de vista geomorfológico, las partes medias de las cuencas corresponden a zonas de deposición de material volcánico de granulometría fina (suelos de baja dureza, o alto potencial erosivo), y por otro, desde el punto de vista topográfica (Figura 13),

debido a la disminución de las pendientes, es en esta zona que se deposita la mayor cantidad de material erosionado en la parte alta de estas cuencas.



1

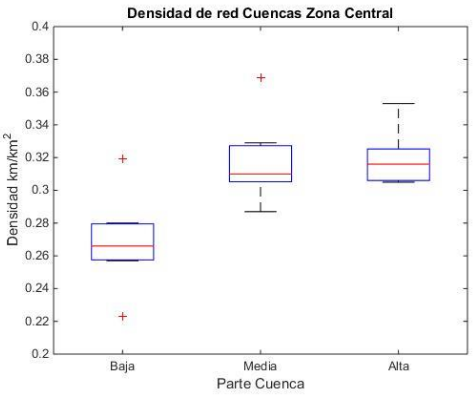


2

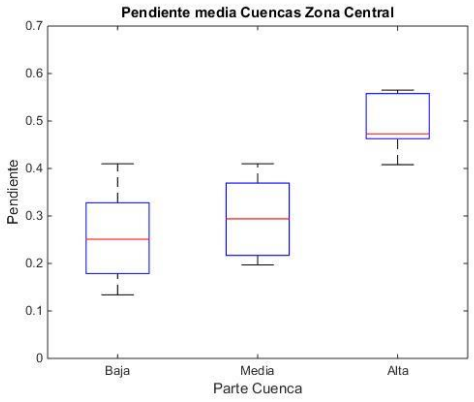
Figura 12: Comparación de la distribución de variables geológicas en la zona Central de Chile. 1 Dureza; 2 Permeabilidad

Topográficas

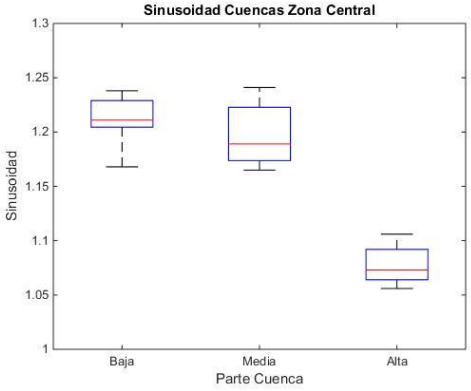
En la Zona Central, ocurre un aumento sostenido en la densidad de red desde la parte baja a la parte alta de la cuenca, favoreciendo la creación en la red teórica de ríos o arroyos de bajo orden, importantes desde el punto de vista ecológico y que constituyen la mayor parte del sistema fluvial en cualquier cuenca (Allan & Castillo, 2007). En la parte baja de las cuencas, debido a la baja pendiente, se favorece la creación de meandros, aumentando de esta forma el índice de sinuosidad (Figura 13.3) de las redes en las partes bajas. Por el contrario, en las partes altas debido a su alta pendiente, los ríos aumentan su velocidad y por ende su capacidad de transportar sedimento y erosionar el suelo, formando cauces más rectos.



1



2



3

Figura 13: Comparación de la distribución de variables topográficas en la zona Central de Chile. 1 Densidad de Red; 2 Gradiente; 3 Sinusoidad

4. CONCLUSIONES

Las Cuencas Virtuales generadas en este estudio presentan redes fluviales con estructuras espaciales que se ajustan bien a la realidad, representando en muchos casos una mejora sustancial respecto a la red oficial de la DGA. Sin embargo, se han detectado pequeños errores de ubicación de las redes en planicies y zonas de baja pendiente, como por ejemplo, en áreas cercanas a pistas de aeropuerto o zonas urbanas; y errores de trazado (no eran dibujadas), en zonas de alta cobertura vegetal como esteros. Estos errores deberían disminuir con una mejor resolución y calidad de DEM (LIDARS).

De igual forma, el aumento de la resolución (escala), de los mapas cartográficos digitales utilizados para derivar algunas variables ambientales (Usos del suelo, Geología), debería generar un aumento sustancial en la representación de las cuencas.

Los resultados del análisis espacial de las variables ambientales a nivel nacional muestran diferencias significativas para la zona norte y sur del país, para algunas variables importantes. Se observaron grandes contrastes en la magnitud de las variables climáticas (aumento de las precipitaciones de norte a sur; disminución de las temperaturas de norte a sur), de usos del suelo (suelos principalmente desnudos y matorrales en toda la zona norte; suelos mayoritariamente forestales en la zona sur) y geológicas (mayor presencia de suelos duros y permeables en el norte; mayor presencia de suelos blandos e impermeables hacia el centro y sur).

La Zona Central de Chile presenta características climáticas menos extremas que las del Sur o las del Norte. Esto permite una mayor diversidad de usos del suelo, desde usos naturales correspondientes a bosques y suelos desnudos (en las partes altas de las cuencas), a usos del suelo puramente antrópicos y relacionados a actividades productivas de gran importancia económica como las explotaciones agrícolas y plantaciones forestales.

Las fuentes de información utilizadas para generar las cuencas virtuales de Chile presentaron una gran variabilidad en cuanto a su resolución y fecha de creación. Por ejemplo, la información geológica y de usos del suelo, poseen diferencias en su fecha de creación de hasta 20 años. No obstante, las cuencas virtuales generadas poseen un gran potencial de actualización. También es posible dotar a estas cuencas con nueva información no incluida en este estudio, como por ejemplo, evapotranspiración, e incluso variables del ámbito socio-económico.

Es posible concluir que Las Cuencas Virtuales representan gran utilidad como herramienta de apoyo para la planificación territorial, la toma de decisiones de inversión y la gestión de recursos hídricos al permitir el manejo de gran volumen de información, de múltiples variables, de manera simple y rápida.

5. REFERENCIAS

Alexander R., Boyer E., Smith R., Schwarz G. & Moore R. (2007) "The Role of Headwater Streams in Downstream Water Quality". *Journal of the American Water Resources Association 43 (1): 41-59.*

Allan J. & Castillo M. (2007). *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. The Netherlands: Springer.

Barquín J., Benda L., Villa F., Brown L., Bonada N., Vieites D., Battin T., Olden J., Hughes S., Gray C. & Woodward G. (2015). "Coupling virtual watersheds with ecosystem services assessment: a 21st century platform to support river reserch and management*". Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, Vol. 2, 609-621.*

Barquín J. & Martinez-Capel F. (2011) "Preface: assessment of physical habitat characteristics in Rivers, implications for river ecology and management". *Limnetica 30(2): 159–168.*

Benda L., Miller D., Barquin J., McCleary R., Cai T. & Ji Y. (2015) "Building Virtual Watersheds: A Global Opportunity to Strengthen Resource Management and Conservation" *Environmental Assessment 57: 722-739.*

Castro H., Carvajal L., (2010). *Conflictos por el agua en Chile: entre los derechos humanos y las reglas del mercado*. Sara Larraín y Pamela Poo, Programa Chile Sustentable.

Fernández D., Barquín J., Álvarez-Cabria M. & Peñas F. (2012) "Quantifying the performance of automated GIS-based geomorphological approaches for riparian zone delineation using digital elevation models". *Hydrology Earth System Sciences 16: 3851–3862.*

Fiebig-Wittmaack M., Pérez C. & Lazo E. (2008) Aspectos Climaticos del Valle del Elqui. Cepeda J. (Ed). *Los Sistemas Naturales de la Cuenca del Rio Elqui: Vulnerabilidad y Cambio de Clima. p: 41-62.* Coquimbo, Chile. Ediciones Universidad de la Serena, Chile.

Gaiser T., Printz A., Schwarz von Raumer H., Götzinger J., Dukhovny V., Barthel R., Sorokin A., Tuchin A., Kiourtsidis C., Ganoulis I. & Stahr K. (2008). "Development of a regional model for integrated management of water resources at the basin scale". *Physics and Chemistry of the Earth, 33: 175-182.*

García A., Sainz A., Revilla J., Alvarez C., Juanes A. & Puente A. (2008) "Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain" *Journal of Hidrology, Vol. 356: 312-326.*

Guisan A. & Thuiller W. (2005) "Predicting species distribution: offering more than simple habitat models." *Ecology Letters Vol. 8: 993-1009.*

Huber A. & Trecaman R. (2002). "Efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de plantaciones de *Pinus radiata* (D.Don) en la zona de los arenales, VIII Región, Chile". *Bosque (Valdivia) 23(2): 43-49.* Recuperado: 2017, Diciembre 7. Doi: https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002002000200005.

Ji Y. (2014) "Potential Risk assessment of forest watershed ecosystem and category hazard area based on the NetMap Toolset, China." Ph.D. Dissertation, Northeastern Forestry University, Harbin, China.

Ji Y., Tijui C. & Cunyoug J. (2013) "An introduction to NetMap: a new technology of management and assessment of forest watershed ecosystem". *Forest Engineering 29: 44–48.*

Karger D., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R., Zimmermann N., Linder H. & Kessler M. (2017) "Climatologies at high resolution for the earth's land Surface areas". *Scientific Data: Open Descriptor. 4: Art. N. 170122*. Recuperado 2017, Septiembre 15. (Scientific Data) Doi: 10.1038/sdata.2017.122.

Lara A., Little C., Urrutia R., McPhee J., Alvarez-Garreton C., Oyarzun C., Soto D., Donoso P., Nahuelhual L., Pino M. & Arismendi I. (2009). "Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile". *Forest Ecology and Management 258: 415-424. Recuperado: 2017, Diciembre 7. Doi:* https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.004 .

Liu Y., Gupta H., Springer E. & Wagener T. (2008) "Linking science with environmental decision making: Experience from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management". *Environmental Modelling & Software 23: 846-858.*

McCleary R. & Hassan M. (2008) "Predictive modeling and spatial mapping of fish distributions in small streams of the Canadian Rocky Mountain foothills". *Can J Fish Aquat Sci 65:319–333.*

McCleary R., Hassan M., Miller D. & Moore R. (2011) "Spatial organization of process domains in headwater drainage basins of a glaciated foothills region with complex longitudinal profiles". *Water Resour Res 47:1–17.*

Miller D., Benda L., Furniss M. & Penney M. (2002) "Program for DEM analysis, in Landscape Dynamics and Forest Management". Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-101CD, U.S.D.A. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CD-ROM.

Ministerio de Obras Públicas: Dirección General de Aguas (1995). *Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica*. Santiago: Chile.

Ministerio del Interior y Seguridad Publica. (2015) "*Política Nacional para Recursos Hídricos 2015*". Santiago, Chile.

Muñoz E. (2017) "Correcting precipitation records in south-central Chile. A reverse modeling approach" *Geophysucal Research Abstracts Vol. 19.*

Naiman R., Bunn S., Nilsson C., Petts G., Pinay G., & Thompson L. (2002). "Legitimizing fluvial systems as users of water: an overview". *Environmental Management* 30:455-467.

Nakamura T. (2003). "Ecosystem-based River Basin Management: its approach and policy level application". *Hydrological Processes, 17: 2711-2725.*

NetMap. (2017). Virtual watershed and analysis tools. TerrainWorks Inc. *www.terrainworks.com.*

Peñas F., Fernández F., Calvo M., Barquín J. & Pérez L. (2011) "Influence of data sources and processing methods on theoretical river network quality". *Limnetica 30 (2): 197-216.*

Peñas F. & Muñoz E. (2017) "Evaluación regional de la alteración hidrológica en los ríos de Chile centro-sur: Implicancias sobre los ecosistemas" *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica (forthcoming).*

Peredo-Parada M., Villarroel M., Quevedo-Tejada D. & Quezada-Romefialli C. (2016). "¿El caudal ecológico determinado al otorgar derechos de agua mantiene un comportamiento ecológico para el género percilla en ríos del centro-sur de Chile?" *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidraulica, 2016, Lima, Perú.*

Petts G. (2007). "Hydroecology: the scientific basis for water resources management and river regulation". In: P.J. Wood, D.M. Hannah and J.P. Sadler (Editors). *Hydroecology and Ecohydrology: Past, present and future, 225-252.*

Tarboton D. (1997) "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models". *Water Resources 33 (2): 309–319.*