



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**EVALUACIÓN DE LA PROVISIÓN DE AGUA BAJO DISTINTOS
ESCENARIOS DE USO DEL SUELO MEDIANTE UN ENFOQUE DE
MODELACIÓN INTERDISCIPLINAR EN LA CUENCA DEL RÍO
CAUQUENES EN DESEMBOCADURA.**

**EVALUATION OF WATER PROVISION UNDER DIFFERENT LAND
USE SCENARIOS THROUGH AN INTERDISCIPLINARY MODELING
APPROACH IN THE CAUQUENES RIVER BASIN.**

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero en Recursos Naturales
Renovables y al Grado de Magíster en Gestión Territorial de Recursos
Naturales

AARÓN ANDRÉS GRAU NEIRA

Directores de Tesis

Dra. Daniela Manushevich Vizcarra.

Dr. Mauricio Galleguillos Torres.

Profesores consejeros

Dr. Rodrigo Fuster Gómez.

Dr. Alexis Vásquez Fuentes.

Evaluador externo

Dr. Jorge Joo Nagata.

Santiago - Chile

2022

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**EVALUACIÓN DE LA PROVISIÓN DE AGUA BAJO DISTINTOS ESCENARIOS
DE USO DE SUELO MEDIANTE UN ENFOQUE DE MODELACIÓN
INTERDISCIPLINAR, EN LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES EN
DESEMBOCADURA**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables y al Grado de Magíster en Gestión Territorial de Recursos Naturales.

AARON ANDRES GRAU NEIRA

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
DIRECTORES DE TESIS		
Daniela Manushevich Vizcarra Bióloga, Dra.	7,0	7,0
Mauricio Galleguillos Torres Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,7	6,7
PROFESORES CONSEJEROS		
Rodrigo Fuster Gómez Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0	7,0
Alexis Vásquez Fuentes Geógrafo, Dr.	6,6	6,6

Santiago - Chile
2022

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Agradezco sinceramente al equipo de académicos a cargo del Programa de Cooperación Internacional entre Chile y China, titulado: “*Management of global change impacts on hydrological extremes by coupling remote sensing data and an interdisciplinary modelling approach*”, especialmente al profesor Mauricio Zambrano y Rodrigo Marinao por su brillante trabajo en la modelación hidrológica incluida en esta tesis. Gracias a ustedes y la beca entregada por la Escuela de Postgrado logré el financiamiento necesario para la obtención de la maestría.

Esta investigación es el resultado de un trabajo en conjunto, en el cual las experiencias y conocimientos obtenidos durante su desarrollo me han fortalecido a nivel personal y profesional. No obstante, esto no hubiese sido posible de no ser por la confianza que me fue otorgada por mis profesores guía: Daniela Manushevich y Mauricio Galleguillos. Soy afortunado de compartir con científicos determinados como ustedes y apoyarlos en empujar los límites de la ciencia día a día.

Quiero agradecer profundamente a mi madre por el tremendo apoyo incondicional que siempre me ha brindado...este logro no habría sido posible sin tu cariño y dedicación. También a toda mi familia Magallánica, en particular a mi tío, Hugo “Nerón” Neira por aconsejarme cuando más lo necesité.

No puedo dejar de mencionar a mis queridos amigos. A Felipe, por su leal amistad, admirable entereza; y si algún día me convierto en padre, espero hacerlo tan bien como tú. A mi amigo de la vida Daniel “Nigga” Rojas, porque desde nuestra adolescencia hemos compartido el mismo sueño y pasión por el motorsport. A Nicolás por su firmeza a la hora de brindarme apoyo y energías para continuar durante los momentos más complicados de mi formación profesional.

Y también quiero nombrar a los nuevos amigos y colegas que conocí durante mi paso por la Universidad de Chile, porque compartimos historias de vida que van más allá de lo profesional y estoy convencido que eso fortalece el vínculo que tenemos. Gracias Eduardo “Edo” Morales y Deelan “dólar” Rus, porque juntos logramos vencer los momentos más difíciles y complejos del pregrado y postgrado; sin nunca olvidar de reír y disfrutar lo que estábamos haciendo. Quiero reconocer el apoyo y voluntad de Guillermo “El Guille” Fuentes cuando aparecieron las barreras técnicas más difíciles al elaborar esta tesis, tu sabiduría y habilidades docentes son una fuente de inspiración para mí.

Finalmente, quiero mencionar a dos grandes personas que han reavivado el sueño de un proyecto que desde el momento que lo imaginé hace 4 años se me dijo no era viable. Estoy convencido de que, junto a Felipe, y como equipo, encontraremos el éxito. Mi infinita gratitud para Juan González y Rodrigo Catalán, dueños de RTD Aysén y TCM Racing, respectivamente, por dar su mejor esfuerzo para construir el motor rotativo más rápido de Chile.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
Seguridad Hídrica y Megasequía	9
La multidimensionalidad de los problemas relacionados al agua.....	10
Convergencias y divergencias epistémicas para afrontar la sequía	11
Sinergia entre la modelación espacial e hidrológica.....	12
HIPOTÉISIS.....	15
Predicciones	15
OBJETIVOS	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS	16
Área de estudio.....	16
Breve reseña histórica de la producción de vino.....	17
Modelación Espacial.....	18
Datos de entrada requeridos por el modelo CLUE-s.	19
Preprocesamiento de los mapas de coberturas.	21
Fuentes de información complementarias para la simulación espacial	22
Proceso de calibración y validación del modelo CLUE-s.....	23
Diseño de los escenarios de uso del suelo.....	24
Diseño y análisis de las entrevistas semiestructuradas	25
Modelación Hidrológica.....	27
RESULTADOS.....	30
Análisis de los mapas de coberturas observados.....	30
Variables predictoras.....	31
Proceso de calibración y validación del modelo espacial.	34
Análisis de las entrevistas	36
Forma epistémica: Discursiva.	37
Forma epistémica: Práctica.	42
Forma epistémica: Prescriptiva.	46
Escenarios de usos de la tierra	49
Escenario de uso de suelo basado en la forma discursiva.....	51
Escenario de uso de suelo basado en la forma Práctico	52
Escenario de uso de suelo basado en la forma escenario Prescriptivo.....	53

Modelación hidrológica	54
Diferencias estadísticamente significativas entre los caudales de los escenarios.	58
DISCUSIÓN	60
Modelación espacial y diseño de los escenarios	60
Formas epistémicas	61
Simulación hidrológica	62
CONCLUSIONES	65
LITERATURA CITADA.....	66
ANEXOS Y APÉNDICES.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de coberturas del año 2018 para el sitio de estudio	16
Figura 2. Cambio de coberturas entre el año 2004 y el año 2018.....	30
Figura 3. Matriz de correlación.....	31
Figura 4. Curvas ROC.....	34
Figura 5. Mapa de coberturas simulado por CLUE-s para el año 2018.....	35
Figura 6. Geolocalización estimada de las entrevistas realizadas.....	36
Figura 7. Escenarios de usos de la tierra simulados.....	49
Figura 8. Resumen de superficies asignadas para cada escenario	50
Figura 9. Modelo hidrológico SWAT+.....	54
Figura 10. Serie de tiempo para los caudales simulados.....	55
Figura 11. Caudales simulados: Verano	56
Figura 12. ETr anual para cada cobertura	57
Figura 13. ETr anual acumulada para cada cobertura.....	57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Matriz de conversión ejemplificada entre un mapa de uso de suelos inicial (t_0) y el final (t_1)	20
Cuadro 2. Criterios de reclasificación para los mapas de coberturas ingresados en el modelo CLUE-s	21
Cuadro 3. Variables predictoras ingresadas al modelo.....	22

Cuadro 4. Sistema de codificación empleado: categorías y códigos	26
Cuadro 5. Matriz de transición correspondiente a los dos mapas de coberturas observados	31
Cuadro 6. Variables filtradas para cada regresión por los algoritmos <i>stepwise</i> y VIF	32
Cuadro 7. Criterio AIC para cada regresión obtenida	32
Cuadro 8. Varianza explicada porcentual explicada para cada modelo de regresión	33
Cuadro 9. Variación del error/acierto de la simulación a distintas resoluciones espaciales	35
Cuadro 10. Parámetros KGE y KGE-García	54
Cuadro 11. Caudales medios mensuales correspondientes a cada escenario	55
Cuadro 12. Comparativa en unidades volumétricas de camiones aljibes y capacidad del Embalse Tutuvén.....	58
Cuadro 13. Prueba HSD de Tukey.....	58

ANEXOS Y APÉNDICES

Anexo 1. Características de las formas epistémicas para comprender la Gestión Integrada del Recurso Hídrico	75
Anexo 2. Parámetros vegetacionales utilizados en SWAT+	76
Anexo 3. Variación de la evapotranspiración real [mm] para las HRU empleadas en SWAT+	77
Apéndice 1. Diagrama metodológico simulación espacial.....	78
Apéndice 2. Pauta para las entrevistas semiestructuradas.....	79
Apéndice 3. Diseño Metodológico para los talleres participativos	82
Apéndice 4. Variable espacial forzante escenario discursivo	87
Apéndice 5. Variable espacial forzante escenario práctico	88
Apéndice 6. Variables eliminadas por el factor de inflación de la varianza (VIF)	89
Apéndice 7. Regresiones logísticas para cada uso de suelo	90
Apéndice 8. Resumen de superficies asignadas	91
Apéndice 9. Prueba HDS de Tuckey	92
Apéndice 10. ETr anual acumulada para el Escenario Práctico	93
Apéndice 11. ETr anual acumulada para el Escenario Discursivo.....	94
Apéndice 12. ETr anual acumulada para el Escenario Prescriptivo.....	95

RESUMEN

Los impactos del cambio global son una fuerte amenaza que afecta a los sistemas socio-ecológicos de la zona central de Chile. La alta ocurrencia de incendios, disminución de la biodiversidad y del agua son algunas de las consecuencias más severas. Los efectos prolongados de la megasequía dejan entrever las debilidades de un sistema de gestión de aguas cuestionado por no favorecer la Seguridad Hídrica. En esta tesis se diseñaron cuatro escenarios alternativos de uso del suelo con el modelo CLUE-s para la Cuenca del río Cauquenes en Desembocadura, bajo la premisa de que es posible incorporar en la simulación espacial diversas maneras epistemológicas de comprender un mismo territorio. La capacidad predictiva del modelo base fue comparada con mapas de coberturas de los años 2004 y 2018, utilizando el 2018 como objetivo de simulación. Los escenarios fueron construidos con información recabada a través de entrevistas semiestructuradas con personas interesadas en la gobernanza hídrica de la cuenca. Todos estos datos fueron analizados cualitativamente para ser categorizados en tres formas epistémicas: 1) discursiva, que centra su narrativa en elementos valóricos, políticos y de poder ligados al agua. 2) práctica, que comprende la gestión del agua como un ejercicio basado en la experimentación (“prueba y error”). 3) Prescriptiva, que muestra definiciones claras del problema y la solución, debido a su formación científico/académica. Y un cuarto escenario que muestra las dinámicas de cambio de uso del suelo observadas en la cuenca durante la Megasequía. Posteriormente, estos escenarios fueron evaluados hidrológicamente en el modelo SWAT+ para contrastar los efectos en la provisión de agua. Los resultados principales de este estudio muestran que bajo el Escenario Práctico se demandaría un volumen de agua equivalente a 8,3 veces la capacidad del Embalse Tutuvén. Además, se cuestiona hidrológicamente la opción de aplicar un plan de reforestación masivo en la cuenca. También revelan la presencia de una divergencia epistemológica entre el Escenario Discursivo y el Escenario Práctico, ya que ambos proponen visiones de desarrollo económico contrapuestas. Finalmente, se concluye que la aplicación de este enfoque metodológico puede ser aporte para la elaboración de planes y estrategias dedicadas a fortalecer la Seguridad Hídrica en el sitio de estudio.

Palabras clave: Seguridad Hídrica, Escenarios de cambio de uso del suelo, Formas Epistemológicas.

ABSTRACT

The impacts of global change are a strong threat that affects the socio-ecological systems of the central zone of Chile. The high occurrence of wildfires, decrease in biodiversity and water are some of the most severe consequences. Nevertheless, the prolonged effects of the mega-drought have revealed the weaknesses of a highly questioned water management system for not favoring Water Security. In this thesis, four alternative land use scenarios were designed with the CLUE-s spatial modeling for the Cauquenes catchment, under the premise that it is possible to incorporate various epistemological ways of understanding the same territory into the spatial simulation framework. The predictive capacity of the base model was compared with coverage maps for the years 2004 and 2018, using 2018 as the simulation target. The scenarios were built with information collected through semi-structured interviews with people interested in the local water governance. All these data were analyzed qualitatively to be categorized into three epistemic forms: 1) discursive, which focuses its narrative on ethical, political, and power relation elements linked to water. 2) practical, which understands water management as an experimental exercise (“trial and error”). 3) prescriptive, which shows clear definitions of the problems and the solutions, due to their scientific/academic training. And a fourth scenario that shows the dynamics of land use change observed in the basin during the mega-drought. Subsequently, these scenarios were hydrologically evaluated in the SWAT+ software to contrast the effects on water provision. The main result of this study shows that under the Practical Scenario a volume of water equivalent to 8.3 times the capacity of the Tutuvén Reservoir would be demanded. In addition, the option of applying a massive reforestation plan in the basin is questioned hydrologically. Also reveal an epistemological divergence between the Discursive Scenario and the Practical Scenario, since that both propose opposite visions of economic development. Finally, it is concluded that the application of this methodological approach can be a contribution for the elaboration of plan and strategies dedicated to strengthening Water Security in this catchment.

Keywords: Water Security, Land use change Scenarios, Epistemological forms.

MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA

Seguridad Hídrica y Megasequía

El cambio global como proceso ha generado repercusiones a nivel mundial sobre el recurso hídrico, dentro de las cuales, destacan los eventos hidrológicos extremos como sequías e inundaciones (Paterson *et al.*, 2013). En el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas hace un llamado urgente al mundo político para priorizar la búsqueda de mecanismos de adaptación para combatir el cambio climático (meta N°13). Con la finalidad de resguardar el agua, se ha adoptado el concepto de Seguridad Hídrica para facilitar la discusión sobre la gestión de las aguas (Cook and Bakker, 2012). Una particularidad relevante de este concepto es su escala temporal tanto presente como futura (Cook and Bakker, 2012). No obstante, Cardwell (2006) menciona que este concepto suele ser confundido con el de “Gestión Integrada de Recursos Hídricos”, definido como: “un proceso que busca alcanzar objetivos ligados al desarrollo sostenible del agua”. Como consecuencia de este hallazgo, el autor menciona una diferencia entre estos dos conceptos, en donde la Seguridad Hídrica juega el rol de ser la meta deseada u visión objetivo, mientras que la Gestión Integrada de Recursos Hídricos corresponde a la manera por la cual se buscaría alcanzar los objetivos de aquella meta.

Tal como exponen Cook and Bakker (2012), existen varias definiciones para Seguridad Hídrica; algunas basadas en las necesidades humanas o actividades productivas, y otras que se preocupan de los ecosistemas. Sin embargo, la definición propuesta por la Asociación Mundial del Agua propone un alcance interdisciplinar e integrador de estas dimensiones: “asegurar que el agua dulce, las zonas costeras y los ecosistemas relacionados se encuentren protegidos y mejorados, que se promueva el desarrollo sostenible y la estabilidad política, que cada persona tenga acceso a suficiente agua potable y a un costo asequible para permitir una vida saludable y productiva” (Peña, 2016). Ahora bien, la generalidad del concepto representa un problema para su operatividad en casos prácticos, y es por ello, que segmentar en dimensiones y/o indicadores es una de las maneras más frecuentes de aproximarse a casos de estudio que pretendan aplicar el concepto de Seguridad Hídrica (e.g. Fuster *et al.*, 2017; IMTA, 2017).

En el caso de nuestro país, la sequía es uno de los eventos hidrológicos que más preocupa a los tomadores de decisiones, mundo científico y organizaciones de la sociedad civil (CR2, 2015), esto porque, a partir del análisis de datos meteorológicos para Chile central y sur, se ha demostrado que desde mediados de los años 70 las temperaturas han ido en incremento, mientras que la precipitación ha ido disminuyendo (Boisier y Aceituno, 2006; Boisier *et al.*, 2016). A lo anterior, se incorpora la ininterrumpida secuencia de años secos desde el año 2010, denominada “Megasequía”, caracterizada por una reducción en la precipitación en el rango del 35% a 45%. Y entre sus consecuencias más significativas, se encuentra la alteración de los coeficientes de escorrentía y la reducción en la productividad de la vegetación (Garreaud *et al.*, 2017), junto con un incremento aproximado del 50% en la ocurrencia de

incendios (González *et al.*, 2011; González *et al.*, 2018), los cuales han alcanzado magnitudes sin precedentes (CONAF, 2019).

La multidimensionalidad de los problemas relacionados al agua

La perspectiva anteriormente mencionada, nos da cuenta de la magnitud del problema dentro de los límites biofísicos, pese a que existen estudios que exponen la multidimensionalidad de los problemas asociados al agua. El caso de nuestro país ha sido estudiado por autores nacionales y extranjeros, quienes han dedicado sus esfuerzos en comprender las causas e implicancias de un sistema de gestión hídrica basado en las transacciones de derechos de otorgamiento de aguas por parte de privados que carece de mecanismos regulatorios por parte del Estado (Bauer, 1998; Budds, 2004; Hadjigeorgalis and Lillywhite, 2004; Budds, 2013; Budds, 2018; Budds, 2020; Bakker, 2020). Sobre esta materia la discusión académica se centró en comprender las consecuencias ecológicas del Código de Aguas, pero actualmente la discursiva ha cambiado y hoy deja entrever que los problemas relacionados al agua no son solo desafíos técnicos que deben ser abordados por hidrólogos, sino que es una materia de índole política, lo cual obliga la participación de otras disciplinas y diversas organizaciones de la sociedad civil (Conca, 2006).

La inclusión de esta diversidad de actores como mecanismo central para la participación, dice relación con la importancia que tiene la dimensión social en un nivel local, ya que esta posee la capacidad de combinar diversos tipos de conocimientos (Folke, 2004). Lo que conlleva transformar la labor hacia la búsqueda de consensos para fomentar los flujos de información entre los actores sociales (Folke, 2004). En la práctica, estas ideas suelen ser probadas bajo técnicas de participación, tales como los talleres participativos o la generación de escenarios (Stringer *et al.*, 2006), siendo el punto de convergencia entre estas temáticas la preocupación por el futuro. Bajo este marco de referencia, entonces es posible situar en una escala temporal futura la discusión y análisis, lo cual es compatible con la delimitación conceptual de Seguridad Hídrica. Al respecto, Polasky *et al.*, (2012) proponen que los escenarios permiten vislumbrar los posibles efectos que acarrearán determinadas elecciones o decisiones, comprendiendo a los escenarios como un conjunto de historias plausibles que son producto de la información y simulaciones basadas en algoritmos matemáticos-estadísticos. En la práctica, estudios relacionados a temáticas socioambientales han concluido que la modelación de escenarios debe ser concebida como un ejercicio interdisciplinar que incluya la diversidad de conocimientos en sus distintas formas (Nassauer and Corry, 2002; Griewald *et al.*, 2017). Al respecto, Friedmann (1992) aporta que el proceso de planificar y gestionar el territorio debe considerar a las formas de conocimiento experto (científico/formal) y experimentada; siendo esta última, aquel conocimiento que no se encuentra codificado en repositorios de información formal, sino que se suele expresar a través del discurso y la narrativa de las comunidades locales. Pese a ello, hay que tener en consideración que las percepciones de estas comunidades locales sobre la realidad no necesariamente pueden coincidir con los cambios ecosistémicos que se han producido en un lugar (Pauli, 1995). Este fenómeno, es conocido como “Síndrome de Línea de Base Cambiante”, y se ha demostrado que ocurre cuando las condiciones ambientales han cambiado rápidamente, mientras que

procesos sociales y psicológicos aún no han sido capaces de adaptarse a dichos cambios (Pauli, 1995). Por lo tanto, no es posible predecir como las fuentes de conocimiento de tipo experimentada están percibiendo su territorio.

Sobre esta materia, Berkes y Folke (2000) concluyen que trabajar en aproximaciones que deriven en encuentros entre la ciencia ambiental y las fuentes de conocimiento local, serían una herramienta clave y crítica para avanzar en una planificación ecosistémica resiliente (e.g. Olsson *et al.*, 2004). Para ello, primero sería necesario identificar con antelación los potenciales umbrales ecológicos tolerables por los sistemas ecológicos (Horan *et al.*, 2010). Teniendo en claro lo anterior, resulta necesario ahondar más sobre cómo estas distintas formas de conocimiento proponen afrontar y solucionar las problemáticas asociadas al agua.

Convergencias y divergencias epistémicas para afrontar la sequía

Los autores Mukhtarov y Gerlak (2013) proponen que existen tres formas epistemológicas recurrentes para comprender y afrontar los conflictos relacionados al agua: 1) Discursiva, que es una manera más ambigua de comprender las cosas, porque centra la discusión y sus argumentos en torno a elementos valóricos, éticos y en las redes de poder que se forman en torno al agua. Pero no por ello es menos reflexiva, al contrario, ya que posee un fuerte simbolismo que se deja entrever mediante la construcción de elementos significativos dentro de su propio contexto. 2) Prescriptiva, que ofrece definiciones claras de los problemas y de las soluciones (“como debieran ser las cosas”). Bajo esta concepción, los conocimientos adquiridos son externos al contexto, y la fuerza de sus argumentos recae en la validación de modelos científicos elaborados desde la ingeniería e hidrología. Por ello, la narrativa de la forma prescriptiva centra sus esfuerzos en cómo implementar los modelos hídricos, pudiendo estar o no presente la participación pública debido a que el debate está centrado en la aplicabilidad de los proyectos, por lo cual la lógica predominante es instrumental. 3) Práctica, la cual propone abordar las complejidades de la problemática hídrica mediante soluciones fundadas bajo una perspectiva situacional, es decir que su fuente de conocimiento proviene de la interacción con su entorno y experiencias previas (Mukhtarov and Gerlak, 2013), como, por ejemplo, la implementación de planes y estrategias gubernamentales para fortalecer la gestión hídrica.

Estas formas epistémicas se pueden diferenciar entre sí de tres maneras¹:

Primero, por su esencia; que es el centro argumental de la narrativa. En la forma epistémica prescriptiva se ofrecen claras definiciones de la problemática y sus eventuales soluciones, mientras que en la forma discursiva aparece una narrativa centrada en los valores, la ética y un alto simbolismo asociado a la política, y en la forma epistémica práctica la relevancia contextual es clave para la articulación de sus ideas.

Segundo, por su forma de expresión, que son todos los fundamentos que apoyan a la argumentación. En la forma discursiva los fundamentos están centrados en las dinámicas de

¹ En el Anexo N°1 se presenta una tabla que resume las características propias de cada forma epistémica.

poder y el simbolismo de la política, también son claves los reportes y pautas del agua que emiten organismos internacionales. Mientras que, bajo una forma epistémica prescriptiva, la fundamentación se basa en los planes y proyectos elaborados para la gestión hídrica. En el caso de la forma práctica, se centra en los mecanismos de evaluación y en los modelos de planificación participativos.

Tercero, y derivado de la forma de expresión de estas formas epistémicas, está la lógica en la que se sustentan las ideas. Bajo una forma epistémica prescriptiva, es posible observar actores comportándose bajo una lógica instrumentalista, la cual se caracteriza por haber definido las metas y los medios por los cuales se afrontan los problemas de gestión del agua con antelación. En contraste, está la lógica social de la apropiación y la inclusividad, enfocada en cómo se distribuye el poder en los distintos niveles de gobernanza. En la forma práctica, rige una lógica de cumplimiento de las metas y normativa vigente, por lo cual se rigen bajo un principio de concretización. Generalmente, los actores que poseen afiliación gubernamental se asocian con la forma práctica, mientras que actores locales y ONGs responden a la forma discursiva (Mukhtarov and Gerlak, 2013). Por otra parte, al alinear estas formas epistemológicas con las ideas planteadas por Friedmann (1992), parece lógico que el conocimiento de tipo experto muestre cercanía con las formas prescriptivas y prácticas, al lidiar la sequía como un desafío técnico, mientras que las fuentes de conocimiento experimentado se acercan más a la forma epistemológica de tipo discursiva por su discurso fundamentado en los valores y ética en torno al agua.

Sinergia entre la modelación espacial e hidrológica

Ahora bien, se debe considerar que estas complejas dinámicas socioambientales son dependientes del contexto, razón por lo cual es necesario situarlas dentro de un espacio geográfico, en este caso; la superficie de la tierra comprendida dentro de una cuenca (Rindfuss *et al.*, 2004), ya que es el campo de acción en donde ocurren interacciones entre la naturaleza, el agua y la sociedad (Boelens *et al.*, 2016). Una vez esclarecida la escala espacial, la relevancia recae sobre las variables que son posibles de cuantificar y que posean una representación espacialmente explícita, por ejemplo, los cambios de uso de suelo o cobertura del suelo: “LULCC” (*Land Use Change / Land Cover Change*). Para estudiar estas dinámicas de cambio, la geografía ha aportado conocimiento científico mediante la creación de modelos dedicados a la predicción, simplificando así el análisis de estas dinámicas complejas, las cuales, al ser combinadas con escenarios alternativos permiten evaluar el impacto sobre los usos del suelo que conllevan diversas decisiones económicas, políticas, sociales y ambientales en el futuro (Castella and Verburg, 2007; Manushevich and Beier, 2016; Manushevich *et al.*, 2019).

Por su parte, los modelos de simulación y/o predicción de LULCC se pueden clasificar en cinco tipos: Modelos Económicos Sectoriales, Modelos Económicos Espacialmente Desagregados, Basados en Agendas, Automatas celulares y de Aprendizaje automatizado (*Machine Learning*) (Brown *et al.*, 2013). Estos últimos ponen énfasis en la identificación de patrones y vínculos sobre la relación entre el LULCC y una determinada característica

espacialmente explícita, así es la manera por la cual los algoritmos son capaces de determinar la probabilidad de que ocurra o no el cambio (Brown *et al.*, 2013). Variables espaciales como la distancia a los caminos, la aptitud del suelo, la topografía son ejemplos frecuentemente empleados en la elaboración de estos modelos (Veldkamp and Fresco, 1996; Verburg and Overmars, 2007; Manushevich and Beier, 2016).

Dentro de la clasificación de modelos basados en el aprendizaje automatizado, destacan la familia de modelos CLUE (*Conversion of Land Use and Its Effects*) implementados en diversos estudios y países en materia de planificación territorial y evaluación del impacto ambiental que conlleva la aplicación de una determinada política pública (Britz 2011; Lesschen *et al.*, 2017; Manushevich *et al.*, 2019). CLUE realiza la asignación de los usos de suelo en función de la demanda de cada sector, para lograr esto, utiliza cuatro módulos de determinación. A continuación, se nombran cada uno de estos junto con un ejemplo práctico de su aplicabilidad: 1) idoneidad del uso de la tierra (la agricultura no puede situarse en zonas de pendientes pronunciadas). 2) reglas de conversión (prohibir la conversión de zonas urbanas en pastizales). 3) uso de suelo vecino (es probable que la expansión de las áreas urbanas ocurra en zonas ya existentes). 4) la demanda de superficie de cada uso de suelo (se proyecta que la agricultura en la zona de estudio incrementará en 250 hectáreas) (Verweij *et al.*, 2018).

Tanto en cuencas de Chile como del mundo se ha puesto a prueba la aplicación de estos modelos espaciales considerando la participación de las comunidades locales (Carlsson *et al.*, 2015; Delmotte *et al.*, 2017; Henríquez-Dole *et al.*, 2018), y se ha demostrado que el resultado de aplicar estos enfoques participativos promueve y enriquece la capacidad de manejo adaptativo a nivel local (Nieto-Romero *et al.*, 2016), ya que incorporan las visiones de la gente sobre su propio territorio, permitiendo contrastar y compatibilizar intereses en un contexto de ejercicios deliberativos y formativos (Kolkman *et al.*, 2007; Griewald *et al.*, 2017).

La congruencia entre la modelación espacialmente explícita basada en escenarios y la Seguridad Hídrica se produce al considerar que los usos de la tierra son una variable de entrada trascendental para los modelos hidrológicos (Öztürk *et al.*, 2013; DeFries y Eshelman, 2004), con los cuales es posible estimar la provisión de agua en una cuenca (Gimeno, 2019). Cabe destacar, que estudios como el de Notter *et al.*, (2012) demuestran que es posible estimar la provisión de agua futura a partir de modelos espacialmente explícitos, teniendo en cuenta que este tipo de modelación requiere estimar y conocer con antelación otras variables que inciden en los procesos hidrológicos: evaporación, escorrentía, infiltración, recarga subterránea, tipo de suelo, entre otros (Nugroho *et al.*, 2013; Lin *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017).

En síntesis, el problema de investigación detectado dice relación con los distintos enfoques epistemológicos que existen tanto para alcanzar la Seguridad Hídrica como para afrontar situaciones de Inseguridad Hídrica. La generalidad de la Seguridad Hídrica como concepto obliga a estudiarlo de manera segmentada y en función de sus dimensiones². Mientras tanto,

² A partir de este punto, las referencias sobre el concepto de Seguridad Hídrica están enfocadas exclusivamente en la dimensión de disponibilidad hídrica.

existen proyecciones climáticas que muestran una disminución en la disponibilidad futura de agua para las cuencas de Chile central. Es por esta razón, que es importante avanzar en mecanismos de planificación territorial adaptativos e inclusivos. Una de las maneras propuestas para lograr aquello, es a través de la incorporación de las distintas formas de conocimiento que poseen las partes interesadas en los conflictos relacionados al agua. El reconocimiento de estas diversas formas epistémicas puede crear un espacio compartido de dialogo abierto, disminuyendo así la polarización de las narrativas. Gracias a los avances en la modelación espacial, es posible incorporar estas distintas visiones de un mismo territorio y ponerlas a prueba bajo criterios hidrológicos, contando así con una herramienta de evaluación para situaciones de Seguridad o Inseguridad Hídrica. En consecuencia, la pregunta de investigación central de este estudio recae en determinar los efectos sobre la provisión de agua que conlleva la aplicación de los Escenarios Discursivo, Práctico y Prospectivo.

HIPOTÉISIS

La implementación de al menos uno de los escenarios alternativos de uso del suelo durante la megasequía (2010-2022) hubiera generado una diferencia estadística significativa en los caudales estivales, en comparación con un escenario de uso del suelo representativo de los cambios observados en la cuenca.

Predicciones

- 1) La aplicación del Escenario Prescriptivo incrementa la disponibilidad de agua en la cuenca, en comparación con los otros escenarios, debido a que se propondrá avanzar hacia la restauración de la vegetación nativa en reemplazo de las plantaciones forestales.
- 2) A pesar de que existen diferentes visiones entre la forma epistémica Discursiva y la Prescriptiva, ambas logran incrementar la disponibilidad de agua en la cuenca, porque proponen desde distintas perspectivas la aplicación de mecanismos de control para las actividades productivas más demandantes de agua.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar los caudales estivales de escenarios alternativos de uso de la tierra que representan, mediante modelos espacialmente explícitos, los distintos enfoques epistemológicos en la cuenca del río Cauquenes en Desembocadura durante el periodo de Megasequía.

Objetivos Específicos

- 1) Simular el cambio de uso del suelo entre los años 2004 y 2018.
- 2) Diseñar escenarios alternativos de uso del suelo en función de las maneras epistémicas de comprender la problemática hídrica en la cuenca.
- 3) Contrastar espacialmente los escenarios alternativos de uso de la tierra.
- 4) Evaluar hidrológicamente la presencia o ausencia de diferencias estadísticamente significativas para todos los escenarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El sitio de estudio es la cuenca del río Cauquenes en Desembocadura (Lat. -35,9; Lon. -72,4). Ubicada en la zona sur de la Región del Maule, colindante con el límite norte de la Región de Ñuble (Ver Figura 1), su superficie es de 162.000 hectáreas aproximadamente (Alvarez-Garretón *et al.*, 2018) y en ella se sitúan las comunas de Cauquenes, Quirihue, Chanco, Pelluhue, Ninhue y Cobquecura. No obstante, la mayor superficie corresponde a las comunas de Cauquenes (75,8%) y Quirihue (20,6%) (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, s.f). Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2017), en la cuenca existen 22 distritos censales y una población estimada de 52.035 habitantes. La concentración de la población en las zonas urbanas durante el año 2017 fue de un 81,9% (I.M. Cauquenes, 2014; Nomade Consultores y Ámbito Consultores, 2019). Las coberturas con mayor abundancia son el matorral (39.54%) y las plantaciones forestales de pino y eucalipto (22.54%).

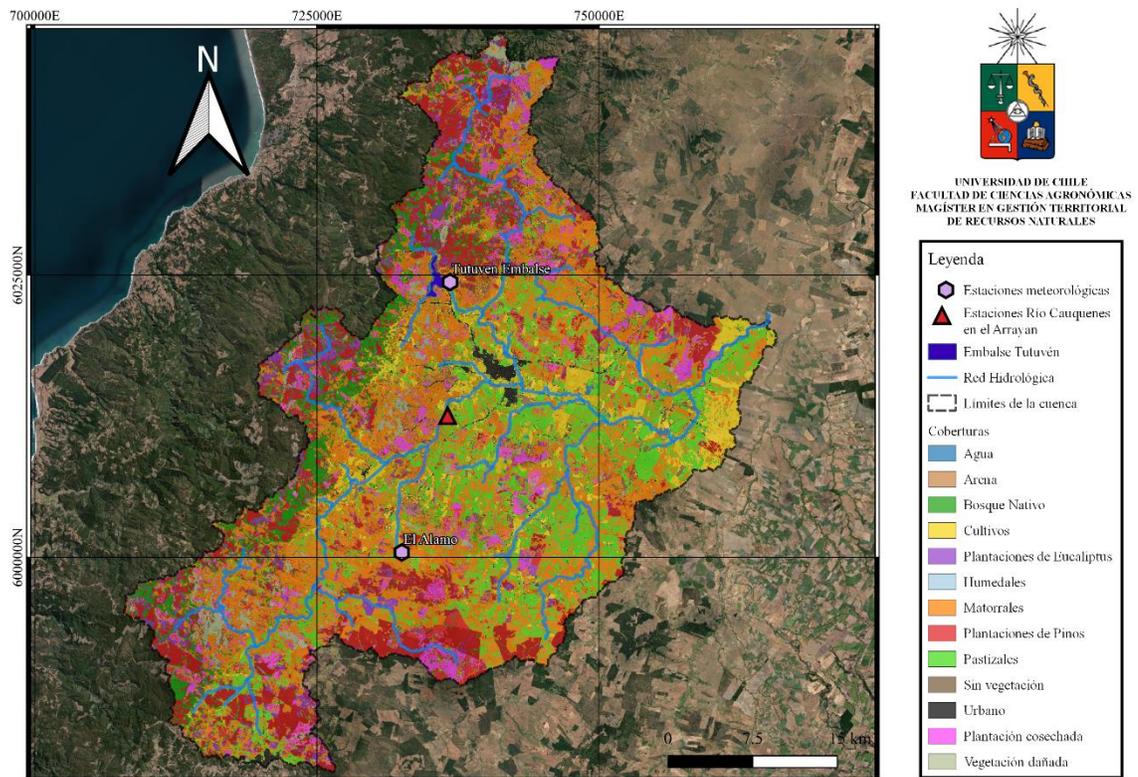


Figura 1. Mapa de coberturas del año 2018 para el sitio de estudio. Fuente: Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas (LABMME), Universidad de Chile (2020).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen-Geiger a escala 1:1.500.000 y actualizada al año 2018, a al sitio de estudio le corresponde la denotación “Csb”, la cual indica una zona climática templada de tipo mediterráneo, con veranos cálidos y con más de

4 meses de temperaturas mayores a los 10°C (Sarricolea *et al.*, 2016). La precipitación anual promedio es de 934 mm, concentrada entre el periodo de abril a diciembre y marcada por una fuerte variabilidad interanual. La cuenca posee un régimen hidrológico pluvial, es decir, que no recibe aportes provenientes del derretimiento de nieves (CR2MET, 2020).

Según datos del Plan Regulador Comunal de Cauquenes (2007), existen dos unidades estructurales de relieve presentes, la Cordillera de la Costa y las Cuencas Marginales del Secano Costero³. La primera, es un cordón que determina los límites de la cuenca que se caracteriza por tener fuertes relieves montañosos, los que llegan a valores de pendiente de un 55%, es por esta razón, que el avance de los pequeños agricultores ha tenido dificultades de desarrollarse en la zona.

Breve reseña histórica de la producción de vino

Información presentada en el Plan de Desarrollo Comunal 2014 – 2018 (PLADECO) menciona que una de las potencialidades claves para el desarrollo económico de la comuna es la producción de vino de secano. Dado su alta relevancia contextual dentro del caso de estudio, se revisó la historia de la matriz productiva, haciendo énfasis en la producción de vino.

Según Lacoste et al (2016) el vino de Cauquenes estuvo dentro de los tres primeros productos en contar con la figura de Denominación de Origen en 1953. La idea principal de la Denominación de Origen fue la de entregar un reconocimiento al prolongado esfuerzo de productores por elaborar productos de calidad sobresaliente, lo cual estaba ligado directamente al orgullo identitario de cada zona y que se traducía en una oportunidad de expansión de mercado.

Una de las razones atribuibles al declive económico del asoleado dice relación con que los vinos producidos entre Cauquenes y Concepción estaban muy alejados de la industria de vinos tradicionales de Chile, que en ese entonces tenían sus inversiones concentradas en el Valle del Maipo. Para ese entonces, la economía local de Cauquenes se sustentaba en la producción agropecuaria, específicamente de ganadería que aportaba dos tercios de la riqueza regional, y fue sobre esa base productiva que surgió uno de los primeros productos típicos: el queso de Chanco. Después de la ganadería, el cultivo de la vid resaltaba por su singularidad con respecto a la viticultura tradicional, la cual debía competir con las primeras cepas francesas introducidas a mediados del siglo XIX. Junto con las cepas francesas los productores importaron sus técnicas de producción: aparecen los primeros canales de riego, sistemas de bodegas y sótanos para la conservación del vino. En términos de evaluación económica, una cepa producida en el Maipo podía costar 4 reales cada planta, mientras que en Cauquenes se tazaba a 1 real por planta. Los costos de traslado debido a las largas distancias y dificultades de transporte complejizaban entrada al mercado del vino asoleado de Cauquenes. No obstante, la llegada del ferrocarril fue el punto de inflexión para el vino de secano, ya que a través de este medio logró consolidarse en los centros urbanos importantes de esa época: Valparaíso y Santiago. Previo a la Guerra del Pacífico el vino secano de Cauquenes era el rey de los vinos chilenos y ocupaba un lugar importante en las

³ No se define esta unidad estructural porque el área de estudio se sitúa en el Secano de Interior.

élites, pero una vez terminada la guerra el simbolismo asociado a la victoria militar estuvo ligado al consumo de Champagne francesa. Luego de eso, se vieron fuertemente fortalecidos los productos importados como el oporto, el jerez y el champagne (Lacoste et al, 2016).

Luego de la vuelta a la democracia en el año 1990, la exportación de vino se convirtió en factor clave para empujar la economía. Desde el gobierno central se desarrollaron políticas horizontales que promovieron nuevas inversiones para esta industria que vinieron desde España, Estados Unidos y Francia, y fue durante este periodo que las industrias locales como Montes y Concha y Toro comenzaron a expandir significativamente su producción (Overton *et al.*, 2011; Lebdioui, 2019). Durante los años 1989 y 2002, las ganancias a nivel país atribuibles a la exportación de vino se expandieron de un 7% a un 63%. No obstante, esto significó un proceso de reconversión tecnológica para la optimización de la producción, dejando obsoletas las técnicas aprendidas por los colonos españoles (Overton *et al.*, 2011).

El breve resumen anterior es clave para contrastar la realidad actual de Cauquenes, pues hoy el Estado ha enfocado sus recursos y energías en fortalecer la estructura hídrica (el Embalse Tutuvén y sus canales de regadío) y en entregar fondos para la inversión provenientes desde la Ley de Riego (CNR, 2021). Sobre esta misma materia, el Coordinador Zonal del Maule de la Comisión Nacional de Riego, señaló que durante solo el año 2020 se activaron 29 proyectos de riego en la zona, lo cual significó una inversión de \$1.067 millones impulsada desde el gobierno central. La ejecución de este plan de desarrollo es la razón por la cual grandes industrias vitivinícolas se instalaron en la zona: Undurraga, Santa Carolina y Concha y Toro. A lo cual las agrupaciones ambientales locales han respondido con señales de malestar, protesta pública y denuncias judiciales, por lo que ellos consideran, son casos de uso indebido de los Derechos de Agua que poseen estas empresas (Ciper-Chile, 2020, Cauquenino, 2021, Cauquenesnet, 2021).

Modelación Espacial

El modelo *Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent* (CLUE) tiene por objetivo simular espacialmente los cambios en los usos del suelo en una grilla (Verburg *et al.*, 2002). La asignación espacial de cada píxel se realiza de manera iterativa y en función de las demandas de cada uso del suelo. Para ello, CLUE utiliza los coeficientes beta de una regresión bajo la premisa de que cada celda (i) posee una conversión máxima de probabilidad (P_{tot}) asociada para cada uso del suelo (L_c) sobre un determinado tiempo (t). La probabilidad total, se obtiene sumando la idoneidad de la ubicación ($P_{tot_{i,t,l_c}}$), idoneidad de la vecindad ($P_{nhb_{i,t,l_c}}$), elasticidad de conversión (E_{l_c}) y la ventaja competitiva ($Comp_{t,l_c}$) (Ver Ecuación 1).

$$P_{tot} = P_{tot_{i,t,l_c}} + P_{nhb_{i,t,l_c}} + E_{l_c} + Comp_{t,l_c} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En esta aplicación en particular, se utilizó la versión “CLUE-s” adaptada para el lenguaje de programación R, a través del paquete “*lulcc* Versión 1.0.4” desarrollado por Moulds *et al.* (2015). Es importante destacar que todas las operaciones y cálculos se llevaron a cabo en un

ordenador de alta capacidad de cómputo facilitado el Proyecto NSFC 190019, con el sistema operativo *Linux Mint* 19.2 “*Cinnamon*”, una CPU i7-9700 y con 32GB de RAM.

Para la ejecución del algoritmo CLUE-s fue necesario ingresar cuatro fuentes de datos: 1) Políticas espaciales y restricciones. 2) Configuración específica para la conversión entre las diferentes coberturas de suelo. 3) Demanda por coberturas de suelo. 4) Características de ubicación.

Datos de entrada requeridos por el modelo CLUE-s.

Políticas espaciales y restricciones. Las áreas de restricción son utilizadas dentro del modelo para la asignación de píxeles específicos dentro de la grilla de modelación que cuentan con alguna figura de prohibición de cambio. De esta manera es posible incorporar al modelo ciertas zonas que por regulación institucional y/o normativa no pueden verse afectadas por las dinámicas de cambio de uso de suelo, como son, por ejemplo, las áreas protegidas con alto valor ecológico. En este estudio no se incluyeron zonas de restricción, debido a que no se detectó evidencia de sitios protegidos bajo alguna figura normativa (Parques Nacionales y/o Reservas).

Configuración específica para la conversión entre las diferentes coberturas de suelo. El algoritmo CLUE-s requiere de una matriz cuadrada de tamaño $A \times A$, llamada “matriz de conversión”, donde “ A ” representa la cantidad de categorías de coberturas simuladas. Dentro de las celdas de la matriz se entiende que los valores iguales a uno permiten el cambio entre aquellas categorías. Mientras que el valor nulo da cuenta de una prohibición de cambio. De esta forma, se evitan transiciones que presentan una baja ocurrencia probabilística, como que las zonas urbanas cambien a agricultura.

En esta parte también es posible asignar criterios temporales a las conversiones que son dependientes del paso del tiempo, como la transición de matorral a bosque nativo que es un factor vinculado de las dinámicas ecológicas particulares del sitio de estudio. Primeramente, se requiere establecer el intervalo temporal en el que ocurre una simulación, es decir, cuándo comienza, termina y cada cuánto ocurre cada paso de modelación. Por ejemplo, en la simulación obtenida, se utilizó el año 2004 como año inicial y el 2018 como año objetivo de modelación, y también, se asumió que año a año es posible que ocurra cambio de uso de suelo. Por lo tanto, el intervalo temporal del modelo simulado es de 14 pasos temporales. Cabe destacar que la información de los mapas de coberturas fue entregada por el Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas (LABMME) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, los cuales fueron obtenidos por medio de clasificaciones supervisadas basadas en imágenes satelitales Landsat con observaciones de entrenamiento y validación obtenidas de Google Earth y Google Street View.

Una vez establecida la temporalidad de la simulación, es posible aplicar dos reglas lógicas para simplificar las conversiones complejas: 1) mínimo de años que deben ocurrir previo a que una transición esté permitida, y 2) un máximo de años después de los cuales no se permite el cambio. En el Cuadro 1 se ejemplifica el funcionamiento práctico de este módulo.

Cuadro 1. Matriz de conversión ejemplificada entre un mapa de uso de suelos inicial (t_0) y el final (t_1)

Mapa t_0 / mapa t_1	Categoría A	Categoría B	Categoría C
Categoría A	1	0	104
Categoría B	0	1	1
Categoría C	0	1009	1

1 = Conversión permitida. 0 = Conversión no permitida. Valores ≥ 100 representan la Regla N°1, en el ejemplo: para que la categoría A se pueda convertir a la Categoría C deben pasar a lo menos 4 años. Valores ≥ 1000 representan la Regla N°2, en el ejemplo: transcurridos más de 9 años un píxel de la categoría C no puede convertirse en B.

Demanda por coberturas de suelo. El concepto de demanda dentro del entorno de modelación hace referencia a los requerimientos de superficie, expresado en hectáreas, para cada clase de cobertura considerada en la simulación a lo largo del tiempo. La función “approxExtrapDemand” del paquete “lulcc” extrapola de manera lineal las superficies, entregando así un escenario válido (aunque no necesariamente realista) de demanda entre los dos mapas utilizados.

Características de ubicación. La idoneidad es entendida por el modelo como las relaciones entre un uso de suelo específico con variables biofísicas y socioeconómicas, las cuales se someten a veracidad estadística mediante una regresión de tipo logística, la cual determinará la probabilidad de cambio asociada a cada uso de suelo. De esta manera, se pueden introducir variables predictoras como pendiente, orientación, distancia a cursos de agua y caminos, erosión, profundidad del suelo, entre otras. La selección de las variables predictoras consideradas para la elaboración del modelo se basó en artículos científicos que han utilizado este modelo, verificando que estas representan patrones espaciales invariables en el tiempo, como las variables topográficas. Todas estas variables fueron transformadas a la misma resolución de los mapas de coberturas (90 metros) y como formato de datos tipo *raster*. Para la selección final de las variables, es necesario aplicar filtros de control con la finalidad de evitar la autocorrelación espacial entre variables (dos variables representando un patrón espacial similar). El primer filtro de autocorrelación entre las variables aplicado previo a la realización de las regresiones, a través de una matriz de correlación para identificar preliminarmente aquellas variables que posean una alta correlación espacial entre sí.

La regresión de tipo logística es una aproximación metodológica frecuentemente utilizada en modelos predictivos de LULCC. No obstante, considerando las aptitudes estadísticas del entorno de programación *R* y del paquete “lulcc”, se elaboraron las regresiones para todas las categorías de uso de suelo con un modelo no-paramétrico, *random forest*, eligiendo el algoritmo clasificador de mejor desempeño para la modelación con el criterio que se menciona al final del siguiente párrafo.

Para filtrar y seleccionar las variables predictoras, se utilizó el método *stepwise* de manera tal que primero sean incluidas todas las variables, para luego eliminar aquellas con un *p-value* > 0.02 y seleccionado aquellas con un *p-value* < 0.01 , tal cual como recomiendan los desarrolladores de los modelos CLUE (Verburg, 2006). Finalmente, el último filtro de variables aplicado fue el Factor de Inflación de la Varianza (VIF por su sigla en inglés – *Variance Inflation Factor*), el cual cuantifica la severidad de la multicolinealidad de los

parámetros elegidos por un modelo por medio de la medición del incremento en la varianza de un parámetro de la regresión a causa del efecto de la colinealidad. En este estudio, se eliminaron todas aquellas variables con un valor $VIF > 5$, ya que a partir de ese valor se asume la presencia de colinealidad entre variables (Gareth *et al.*, 2017). Una vez eliminadas las variables conflictivas, se procedió a estimar nuevamente los coeficientes de cada regresión y los modelos finales obtenidos con la regresión logística y *random forest* fueron evaluados utilizando el método *Receiver Operating Characteristic* (ROC), el cual aporta una representación gráfica para evaluar el rendimiento de cada regresión y del modelo en su conjunto (Verburg, 2006).

Preprocesamiento de los mapas de coberturas.

Para la ejecución del modelo espacial en CLUE-s se requiere que los mapas de coberturas ingresados sean comparables, y para ello fue necesario establecer la misma resolución espacial, delimitación y categorías. Las reglas de conversión utilizadas para la reclasificación se muestran en el Cuadro 2.

Para la identificación de las variaciones principales de los mapas procesados, se elaboró con estos una matriz de transición para determinar los cambios permitidos y restringidos entre todas las categorías. Con la matriz de transición también fue posible estimar la cuantía de los cambios entre las clasificaciones de uso de suelo, y derivar de esta un parámetro inicial para las elasticidades de conversión requeridas por el modelo CLUE-s y que deben ser establecidas e ingresadas manualmente por el usuario.

Cuadro 2. Criterios de reclasificación para los mapas de coberturas ingresados en el modelo CLUE-s.

ID original	Categoría	ID reclasificación	Categorías CLUE-s
1	Agua	Nulo	
2	Arenas y playas	5	Suelo desnudo
3	Bosque nativo	0	Bosque nativo
4	Cultivos	1 y 6	Agricultura de secano y de riego*
5	Plantaciones de Eucalipto	3	Plantaciones forestales
6	Humedales	Nulo	
7	Matorrales	4	Matorrales
8	Plantaciones de pino	3	Plantaciones forestales
9	Pastizales	5	Pastizales
10	Suelo desnudo	5	Suelo desnudo
11	Urbano	Nulo	
12	Plantación cosechada	3	Plantaciones forestales

Las 12 categorías incluidas en el mapa de coberturas inicial se reclasificaron en 6 (Categorías CLUE-s). *Las clases Agricultura de secano y de riego fueron obtenidas mediante fotointerpretación de imágenes satelitales y la delimitación manual de polígonos. Esta actividad fue desarrollada por el alumno Sebastián Landeros como parte de su práctica profesional en el LABMME bajo la supervisión del Prof. Mauricio Galleguillos.

También, fue necesario aplicar a ambos mapas de coberturas un filtro de mayoría simple de tamaño 3x3 píxeles para simplificar la identificación de patrones espaciales dentro de la modelación. La aplicación de este filtro reduce el ruido generado por las clasificaciones de

alta resolución; efecto conocido como “*salt-and-pepper*” (“sal y pimienta”) (Hirayama *et al.*, 2018).

Fuentes de información complementarias para la simulación espacial

A través de literatura especializada en los modelos CLUE-s fue posible seleccionar 24 variables predictoras, las cuales influyeron en distinto grado a cada una de las categorías de uso de suelo empleadas en esta simulación. El tratamiento metodológico con estas variables consistió en rasterizar y homogeneizar la resolución a 90 metros, junto con limitar la simulación al área de la cuenca. En el Cuadro N°3 se enumeran cada una de las variables predictoras utilizadas, junto con su respectiva fuente de información. Es importante destacar, que siguiendo las recomendaciones del desarrollador del paquete “*lulcc*”, se utilizó una nomenclatura simple para el tratamiento de las variables dentro del código de *RStudio*, en este caso, fueron llamadas “*ef*” que es el acrónimo en inglés de “*explanatory factor*”. Los tipos de variables predictoras ingresadas al modelo corresponden a información topográfica, tal como: elevación, exposición y pendiente, las cuales fueron obtenidas a partir del repositorio oficial del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por su sigla en inglés), específicamente del producto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) que posee 90 metros de resolución espacial (Farr and Kobrick, 2000). Otros factores relevantes utilizados en este estudio corresponden a la distancia a caminos (pavimentados o no pavimentados), cursos de agua, zonas urbanas e infraestructura de riego. También se utilizaron datos de erosión y profundidad del suelo publicados por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Asimismo, se extrajeron y espacializaron datos del CENSO del año 2002 a escala de distritos censales para estimar el índice de vejez⁴ e incluirlo como variable predictora (INE, 2002).

Cuadro 3. Variables predictoras ingresadas al modelo.

Variable	Fuente	Acrónimo "ef"
Elevación		1
Exposición	DEM SRTM	2
Pendiente		3
Distancia a red vial completa		4
Distancia a caminos pavimentados	MOP, 2015	5
Distancia a caminos no pavimentados		6
Distancia a industrias forestales	INFOR, 2018	7
Distancia a cursos de agua	BCN, 2018	8
Distancia a zonas urbanas	BCN, 2008	9
Distancia a canales de riego		10
Distancia a tranques y embalses de riego	CNR, 2019	11

*Continúa en la siguiente página

⁴ El Índice de Vejez es el porcentaje de personas sobre los 65 años con respecto al total de la población.

Variable	Fuente	Acrónimo "ef"
Superficie de predios [ha]		12
Superficie de riego [m ²]		13
Superficie de secano [m ²]		14
Erosión: Ligera		15
Erosión: Moderada		16
Erosión: Severa	CIREN, 2013	17
Erosión: Muy severa		18
Erosión: Sin erosión		19
Profundidad: Delgado		20
Profundidad: Ligeramente profundo		21
Profundidad: Moderadamente profundo		22
Profundidad: Profundo		23
Índice de vejez	INE, 2002	24

Proceso de calibración y validación del modelo CLUE-s

Para la calibración del modelo, utilizaron los dos mapas de cobertura de suelo correspondientes a los años 2004 y 2018, ambos con las mismas siete categorías, que son: bosque nativo, agricultura de secano, agricultura de riego, plantaciones forestales, matorrales, pastizales y suelo desnudo (Ver Apéndice 1 para cuadro resumen de este segmento).

El proceso de calibración concluye una vez lograda la convergencia de la demanda para todas las categorías de uso de suelo con respecto a la cartografía de referencia del año 2018, esto quiere decir, que, si para el año 2018 se demandaron 2.000 hectáreas de una categoría, el modelo simulado del año 2018 deberá ser capaz de asignar 2.000 hectáreas, con un error estándar promedio recomendado por el modelo de ± 30 píxeles.

Posteriormente, el proceso de validación consiste en un contraste entre los mapas de coberturas observados (2004 y 2018), y el simulado del año 2018, mediante el índice *Fuzzy Kappa Simulation* (FKS) y la similitud porcentual, ya que así se abordan las diferencias generales y particulares el mapa simulado y el observado (Hagen, 2003). Los valores del índice FKS pueden variar desde -1 hasta +1, representando la aleatorización de la simulación los valores negativos y cercanos al cero, y siendo 1 una predicción perfecta. En otras aplicaciones de modelos CLUE y CLUE-s, los valores de FKS obtenidos varían desde el 0.003 hasta 0.375, por lo cual el criterio adoptado en este caso de estudio es iterar la simulación para lograr un valor $FKS \geq 0,2$, el cual se considera aceptable en la literatura (van Vilet *et al.*, 2011; 2013). Para simplificar y evitar períodos largos de cómputo, se considerará que las superficies correspondientes a los cursos de agua y las zonas urbanas no presentan variación durante la simulación y los escenarios, por lo cual no se considerarán dentro de la

simulación. De manera complementaria a este método de validación, se aplicó una comparativa tridimensional entre los mapas observados y el simulado, para identificar de manera simple las fuentes de acierto y error a distintas escalas espaciales (Pontius et al., 2011).

Diseño de los escenarios de uso del suelo.

Se diseñaron cuatro escenarios de LULCC basados en el análisis de información obtenida a partir de 30 entrevistas semiestructuradas, un taller e información contenida en los Planes de Desarrollo Comunales (PLADECO), Plan Regulador Intercomunal (PRI), las Estrategias Regionales de Desarrollo (ERD) y el Plan Secano Maule Sur. Siendo el foco central los aspectos ligados a la gobernanza hídrica de la cuenca y la visión futura del territorio.

Gracias a bases de datos de personas recopiladas en el Proyecto FONDECYT 1171560 y FONDAP 15110009, se contó una base de datos de personas interesadas en colaborar con nuevos estudios ligados al agua. Por lo tanto, se contactó a este grupo para la aplicación de una entrevista semiestructurada (Ver Apéndice 2), y en paralelo, se aplicó la técnica de la bola de nieve para invitar a potenciales candidatos a participar de este estudio. Al mismo tiempo, se trabajó en el reconocimiento de grupos interesados en la gestión local del agua a través de redes sociales, quienes fueron contactados e invitados a participar en este proyecto de investigación. Este enfoque de trabajo permitió el reconocimiento de personas que cumplen roles de vocerías y de articulación entre distintas organizaciones territoriales, lo que en investigación cualitativa es también conocido como “porteros/as” (Berbés-Blázquez, 2012).

Debido a la contingencia sanitaria, se optó por un plan de trabajo flexible y que permita recopilar las percepciones de los participantes de manera presencial y/o remota. Ejecutándose así, cinco campañas en terreno, la primera en marzo del 2020 con fines de exploración y reconocimiento del sitio de estudio. Durante el resto de las campañas de terreno, se decidió prestar especial énfasis en personas ubicadas en zonas rurales, debido a la dificultad de acceder y utilizar medios tecnológicos para participar en una entrevista remota.

En el caso de las instituciones de gobierno local, la estrategia de acercamiento constó en enviar una carta de presentación del proyecto, informando los objetivos principales y solicitando la colaboración de departamentos y funcionarios ligados al desarrollo comunal y de la gestión hídrica. Posteriormente se agendaron entrevistas remotas con funcionarias/os ligados a estas materias.

Además, se organizó un *workshop* con investigadores renombrados en disciplinas como la hidrología, sensores remotos y modelos climáticos, el cual se centró en la construcción de una visión futura sobre la cuenca, considerando la vulnerabilidad en materia de disponibilidad hídrica futura. El ejercicio tuvo por propósito que los participantes no solo logren dar con una visión futura consensuada, sino que también se produzca el cuestionamiento de los pasos a seguir y trabas identificadas para que ese eventual futuro

pueda cumplirse, prestando prioridad en elementos internos y externos del sistema que pueden o no estar bajo su control para ser modificados o mantenidos con miras hacia ese escenario. Asimismo, el ejercicio contempló la presentación de material cartográfico y de datos relevantes para la contextualización de la problemática hídrica del sitio de estudio. Esta actividad (Ver Apéndice 3), ha sido elaborada en base a las herramientas “*Visioning*” y “*Backcasting*” publicadas en “*The Futures Toolkit Edition 1.0*” publicado por la Office for Science del Reino Unido (2017).

Diseño y análisis de las entrevistas semiestructuradas

Debido a que el centro de este estudio son las visiones futuras de distintos actores, se optó por aplicar entrevistas semiestructuradas, ya que le proporcionan al entrevistado la posibilidad de responder de manera amplia (Hernández *et al.*, 2003), y como menciona Spradley (1979): “sirven como estrategia para que la gente hable sobre lo que sabe piensa y cree”. En el Anexo 3 se muestra la estructura general del instrumento aplicado a los participantes de este estudio.

En base a las respuestas entregadas por los participantes, se aplicaron los criterios propuestos por Mukhtarov y Gerlak (2013) para su clasificación en grupos por su forma epistémica de comprender la problemática del agua en su territorio (Ver Anexo 1 que hace mención sobre las principales diferencias entre las formas epistémicas). Siguiendo esta directriz, se diseñaron 4 escenarios: 1) Escenario Prescriptivo, 2) Escenario Discursivo, 3) Escenario Práctico y 4) Escenario *Business as usual* (BAU por su sigla en inglés). Este último escenario, tuvo por propósito proyectar una situación en donde los patrones de cambio de uso del suelo identificados durante el periodo de modelación mantienen su curso tendencial.

Adicionalmente, fue necesario transcribir las entrevistas para su posterior análisis en el *software* Atlas.ti versión 9.0.24. Asegurando así un análisis sistemático de la información cualitativa levantada en las entrevistas. Debido a la aparición de hallazgos relevantes durante las entrevistas, se trabajó en base a un sistema de codificación mixto, es decir, que se establecieron *a priori* códigos y categorías preestablecidas que fueron derivadas del diseño metodológico de la entrevista semiestructurada, y también, se incluyeron otros códigos para incorporar la información entregada por los participantes dentro del análisis cualitativo de sus relatos (Saldaña, 2013). Lo anterior tiene relación con comprender la investigación cualitativa como un proceso inductivo en donde el investigador debe estar preparado si encuentra otros descubrimientos que aporten a corroborar o descartar la hipótesis (Taylor y Bogdan, 2008).

En total se generaron 5 categorías y 33 códigos para la sistematización y análisis de la información recabada usando las pautas de entrevistas (Ver Cuadro 4). Posterior a esta clasificación, se extrajeron individualmente las ideas de visión futura de cada participante, para finalmente llegar a una narrativa común, pero que resuma las ideas principales por cada forma epistémica

Cuadro 4. Sistema de codificación empleado: categorías y códigos.

Categorías	Códigos
Caracterización	Ocupación: Oficio Ocupación: Profesión
Forma epistémica	Esencia: Definiciones claras del problema y la solución Esencia: Relevancia contextual/Aprendizaje basado en la experiencia Esencia: Valores y ética Forma de expresión: Reportes del agua Forma de expresión: Informes técnicos/Planificación participativa basada en modelos Forma de expresión: Planificación en base a la Gestión Integrada de Recursos Hídricos Lógica: Apropiación Lógica: Concretización Lógica: Instrumentalización
Pasado	Rol/Instrumento político Contexto social: Experiencias a través de terceros Contexto social: Experiencias personales Paisaje: infraestructura Paisaje: Vegetación
Presente	Rol/Instrumento político Contexto social: Experiencias a través de terceros Contexto social: Experiencias personales Paisaje: Infraestructura Paisaje: Vegetación Paisaje: Actual
Presente	Rol/Instrumento político Contexto social: Experiencias a través de terceros Contexto social: Experiencias personales Paisaje: Infraestructura Paisaje: Vegetación Paisaje: Actual
Futuro	Las trabas para llegar a ese futuro deseado: Identificación de puntos nodales Paisaje futuro Visión/Predicción: Escenario predicho Visión: Escenario deseado
Relación con el agua, la tierra y el trabajo	Acceso al agua: Asistido Acceso al agua: Propio Clima (pp y t°): Causas Clima (pp y t°): Consecuencias Repertorio de prácticas: Ruralidad Utilización del agua/tierra: Directa Utilización del agua/tierra: Indirecta

Últimamente, para incorporar esta información cualitativa dentro del modelo espacial, se evaluó la situación para cada escenario en función de las ideas que fuesen posibles de espacializar e incluir dentro de la simulación. Los escenarios se pueden resumir de la siguiente forma

1. Escenario Discursivo, se creó una variable forzante que sirvió para representar una situación en donde se prohíbe la presencia de plantaciones forestales cerca de cursos de agua dentro de un buffer de 1 kilómetro⁵. Adicionalmente, se utilizó un mapa de coberturas correspondiente al año 1990, al cual se le extrajo la superficie agrícola y se asignó como demanda de la categoría “agricultura de secano”, ya que la visión conjunta de este escenario pretendía volver a la situación pasada en términos su matriz agrícola (Ver Apéndice 4).
2. Escenario Práctico, en este caso no fue necesaria la aplicación de una variable forzante, solo se modificó la demanda correspondiente a cada cobertura para representar un incremento en la superficie de agricultura de riego y de plantaciones forestales.
3. Escenario Prescriptivo, se elaboró una variable forzante para incrementar la ocurrencia probabilística de situar bosque nativo y matorrales que fueron reemplazados por plantaciones foráneas, con el objetivo de poner a prueba la hipótesis de que la disponibilidad hídrica incrementaría si la cuenca se acercase a un estado prístino (pero dentro de lo plausible). Lo anterior, siguiendo la misma aproximación metodológica de Galleguillos *et al.* (2021), es decir, bajo el criterio de vegetación nativa potencial propuesto por Luebert y Plissock (2018), elaborado para identificar espacialmente los pisos de vegetación (Ver Apéndice 5).

Es importante destacar, que el diseño de los instrumentos aplicados en esta investigación ha sido evaluado y aprobado por el Comité Ético-Científico de la Universidad de la Frontera para asegurar la protección de los participantes de este estudio. Por lo tanto, se asegura el completo anonimato de las identidades de los participantes, junto con las locaciones exactas en donde se realizaron las entrevistas y su afiliación institucional cuando corresponda.

Modelación Hidrológica

Utilizando los escenarios espaciales anteriormente mencionados como datos de entrada, se logró estimar la provisión de agua a escala de cuenca durante el periodo de megasequía (2010 y 2020), aplicando la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT+, por su sigla en inglés), la cual es una versión reestructurada de SWAT (Neitsch *et al.*, 2007; Neitsch *et al.*, 2011; Bieger *et al.*, 2017). SWAT+ es un modelo hidrológico semi-distribuido de código abierto, usado para simular tanto la cantidad como la calidad del agua superficial y subterránea a nivel de cuencas de pequeña y gran escala (Bieger *et al.*, 2017). SWAT+

⁵ Se optó por utilizar 1 kilómetro, ya que el criterio predominante era “no ver las plantaciones cerca de los cursos de agua”.

discretiza la cuenca de estudio, primero definiendo una cantidad determinada de subcuencas a partir las características topográficas dadas por un Modelo Digital de Elevación. Cada subcuenca se divide en Unidades de Respuesta Hidrológica (*Hydrological Response Units*, HRUs), que son áreas agrupadas que cuentan con una combinación única de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente.

El modelo implementado en la cuenca de Cauquenes fue calibrado con un enfoque de optimización multiobjetivo a escala mensual, buscando una adecuada simulación de caudales medios y altos, resguardando a la vez una correcta simulación de caudales mensuales estivales. Así, los objetivos usados consistieron específicamente en dos indicadores de bondad del ajuste: la eficiencia modificada de Kling-Gupta (KGE; Kling et al., 2012), y una versión modificada de este mismo indicador en donde se usa el valor inverso de los caudales (KGE_{García}; García et al., 2017). Se establecieron como periodo de calibración los años 1996-2014 y de verificación 1989-1995 y 2015-2020. La asignación de los parámetros vegetacionales de la cuenca (Ver Anexo 2) y la estimación de la evapotranspiración real para las distintas coberturas (Ver Anexo 3 y 4) se estimaron de igual manera que Galleguillos *et al.*, (2021).

El uso de KGE no está enfocado en un tipo de respuesta en particular (caudales altos, medios o bajos) ya que en base a su formulación está en línea con el paradigma de utilizar múltiples objetivos (Pool *et al.*, 2018), para así evitar un sobreajuste de los parámetros del modelo a un aspecto hidrográfico particular. Por otro lado, KGE_{García} fue específicamente desarrollada para simular caudales bajos (García *et al.*, 2017).

La variable observada fueron los caudales (medidos en m³/s) registrados por la estación fluviométrica de Cauquenes en Arrayán, propiedad de la Dirección General de Aguas y que contiene registros a escala diaria desde el año 1979 en adelante. Por otra parte, la variable de salida del modelo SWAT+ fueron las series de tiempo de los caudales mensuales para todos los escenarios.

Luego de la obtención de las series de tiempo para cada escenario, se procedió con la búsqueda de diferencias significativas entre los caudales estivales. En esta aplicación, se consideraron los meses de enero, febrero y marzo como el periodo estival. Posteriormente, los escenarios fueron contrastados utilizando la prueba múltiple de “Diferencia Honestamente Significativa de Tukey” (HDS Tukey por su sigla en inglés), la cual está diseñada para utilizarse cuando el tamaño muestral por niveles es equivalente (Miller, 1981; Yandell, 1997). El valor de referencia para determinar la existencia o inexistencia de diferencias significativas fue de un 95% de certeza ($\alpha=0,05$).

En función de simplificar la transmisibilidad de la información obtenida, se optó por emplear métricas volumétricas de simple compresión para la comparación de los escenarios, considerando la diferencia entre las medias de los caudales estivales de los escenarios, con la media estival del Escenario Base. De esta manera, 2 métricas fueron empleadas:

1. Número de veces que se puede suplir la demanda actual de camiones aljibes durante un periodo estival. Considerando una capacidad de almacenamiento para cada camión de 10.000 litros. Y teniendo en cuenta que actualmente el municipio gestiona la

entrega semanal de 132.650 litros semanales para 121 familias en la cuenca⁶, por lo tanto, la demanda total durante el periodo estival para la cuenca corresponde a 1591,8 m³/verano.

2. La capacidad de almacenaje del Embalse Tutuvén, ya que es una obra de contención de aguas utilizada con fines de riego dentro de la zona de estudio y que tiene una capacidad de 22.000.000 m³ (MOP, 2021). Para este caso, se utilizó la diferencia entre los promedios de los caudales anuales de los escenarios discursivo, práctico y prospectivo, y el promedio anual del Escenario Base.

Cabe destacar, que la puesta en marcha y ejecución de la modelación hidrológica en el modelo SWAT+ estuvo a cargo del equipo de hidrología del proyecto NSFC 190019.

⁶ Información entregada por la I.M. de Cauquenes (2021).

RESULTADOS

Análisis de los mapas de coberturas observados

A partir del proceso de reclasificación de los mapas de coberturas originales se obtuvieron dos archivos tipo *raster* para los años 2004 y 2018 observado. Dentro de los cambios principales, destaca la conversión de la cobertura de bosque nativo en plantaciones forestales y en matorrales (3.900 ha y 3.700 ha respectivamente). También recalcar el incremento en la superficie forestal en la cuenca, que es posible observar en la transición de matorrales a plantaciones forestales (11.000 hectáreas aproximadamente). Otro dato relevante es el cambio neto porcentual, que en este caso es de un 44,94% de la superficie de la cuenca, tal como se puede apreciar en la Figura 2.

Por otra parte, la matriz de transición aporta información sobre los cambios con baja ocurrencia probabilística, los cuales son considerados dentro de la matriz de conversión del modelo CLUE-s posteriormente (Ver Cuadro 5).

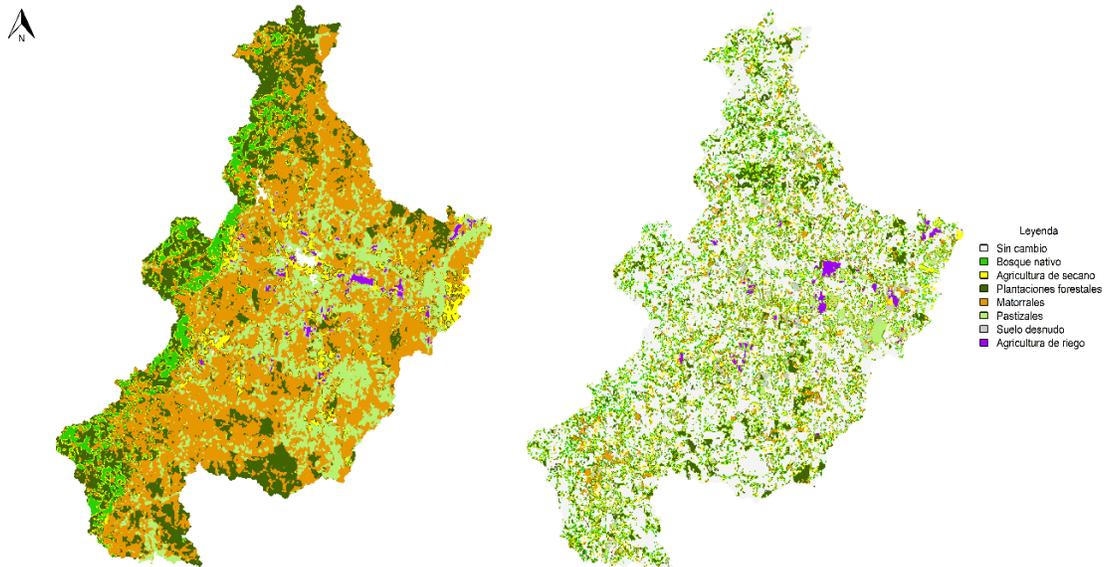


Figura 2. Cambio de coberturas entre el año 2004 y 2018 observado. De izquierda a derecha, el primer mapa representa espacialmente las coberturas del año 2004, y el siguiente mapa muestra los cambios ocurridos al año 2018 (los espacios en blanco expresan que no ocurrió cambios en esa zona).

Cuadro 5. Matriz de transición correspondiente a los dos mapas de coberturas observados.

t_0/t_1	Bosque nativo	Agricultura de secano	Plantaciones forestales	Matorrales	Pastizales	Suelo desnudo	Agricultura de riego
Bosque nativo	9.416	93	4.354	4.069	29	97	47
Agricultura de secano	67	5.902	1.347	1.657	1.293	357	405
Plantaciones forestales	1.217	87	33.586	4.527	583	772	77
Matorrales	2.279	2.062	13.119	57.222	10.074	1.882	870
Pastizales	136	1.226	1.805	10.980	18.783	1.474	998
Suelo desnudo	9	12	38	106	46	73	4
Agricultura de riego	4	51	1	30	19	2	2.180

Donde, t_0 = *mapa observado* año 2004; y t_1 = *mapa observado* año 2018. Cada valor representa un píxel de 90 metros.

Variables predictoras

La revisión de la matriz de correlación de las variables predictoras utilizadas en este modelo arroja un caso de alta correlación positiva que se da entre la variable elevación (ef01) y la pendiente (ef02), con un valor de 0,62. Sin embargo, ese valor está dentro de los parámetros aceptables, y es esperable debido a que la pendiente es una derivada topográfica de la elevación. También es posible observar una correlación negativa entre las variables pendiente (ef03) y erosión severa (ef19) con un valor de -0,52. En la Figura 3 se muestra la matriz de correlación.

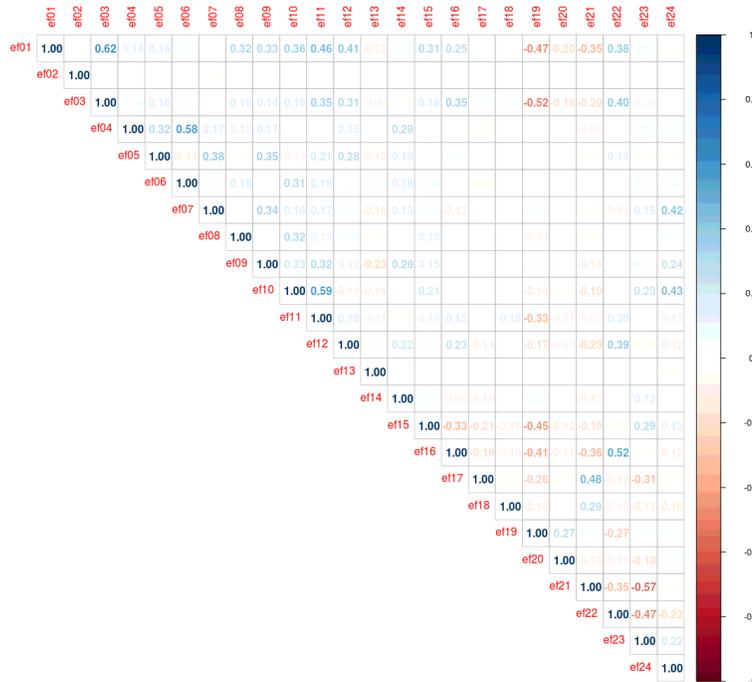


Figura 3. Matriz de correlación entre las variables (presentadas por el acrónimo “ef” mencionado en el Cuadro 2). Los valores próximos al -1 y 1 representan correlación positiva o negativa entre las variables (colores rojo y azul respectivamente).

Con respecto al proceso de selección y filtrado de las variables predictoras, tanto el algoritmo *stepwise* como el VIF logan eliminar aquellas variables que reducen la capacidad predictora del modelo. En el Cuadro 6, se presenta un resumen de las variables filtradas por cada algoritmo para todas las categorías simuladas.

Cuadro 6. Variables filtradas para cada regresión por los algoritmos *stepwise* y VIF.

Variables	Bosque Nativo	Agricultura de Secano	Plantaciones Forestales	Matorrales	Pastizales	Suelo desnudo	Agricultura de riego
ef01	ef01	ef01	ef01	ef01	ef01	ef01	ef01
ef02	ef02	ef02	ef02	ef02	ef02		
ef03	ef03	ef03		ef03	ef03	ef03	ef03
ef04		ef04	ef04	ef04	ef04	ef04	ef04
ef05	ef05	ef05	ef05	ef05	ef05	ef05	ef05
ef06	ef06	ef06	ef06	ef06	ef06		ef06
ef07	ef07		ef07	ef07	ef07		ef07
ef08	ef08	ef08	ef08				ef08
ef09	ef09	ef09	ef09	ef09	ef09		ef09
ef10	ef10	ef10	ef10	ef10	ef10	ef10	ef10
ef11	ef11	ef11	ef11	ef11	ef11	ef11	ef11
ef12	ef12	ef12	ef12	ef12	ef12	ef12	ef12
ef13	ef13	ef13	ef13	ef13			ef13
ef14	ef14	ef14	ef14	ef14	ef14		ef14
ef15							
ef16						ef16	ef16
ef17							
ef18		ef18					ef18
ef19						ef19	ef19
ef20	ef20					ef20	ef20
ef21						ef21	
ef22						ef22	ef22
ef23						ef23	
ef24	ef24	ef24		ef24	ef24	ef24	ef24

Verde = Variables que fueron consideradas en la regresión final. Naranja = filtradas por VIF⁷. Azul = Filtradas por *stepwise*.

De manera complementaria se expone una estimación relativa entre la bondad de ajuste del modelo y la complejidad de este a través del criterio de información Akaike (AIC) (Ver Cuadro 7), el cual muestra que en el caso de la categoría Suelo desnudo el conjunto de predictores considerados no es capaz de ajustar los datos adecuadamente en comparativa con los otros modelos ajustados. Cabe destacar, que la muestra con menores datos observados dentro de las categorías simuladas corresponde a Suelo Desnudo.

Cuadro 7. Criterio AIC para cada regresión obtenida.

	Bosque nativo	Agricultura de secano	Plantaciones forestales	Matorrales	Pastizales	Suelo desnudo	Agricultura de riego
AIC	60.968	47.834	110.582	180.545	108.844	2.823,7	12.898

⁷ Revisar Apéndice N°6 para mayor detalle.

Por otra parte, la influencia probabilística que determina la (no)ocurrencia de las categorías de uso de suelo está dada por los coeficientes beta (β) de la regresión logística y por la capacidad predictiva propia de cada modelo para predecir patrones espaciales. Basándose en esta premisa, es posible establecer que el Bosque Nativo está fuertemente relacionado de manera positiva con factores topográficos como la pendiente y la elevación. En el caso de la agricultura de secano el valor máximo de β se da con la variable índice de vejez, por ende, el patrón espacial detectado es que en aquellos distritos censales en donde predomina la población adulto mayor es probable encontrar agricultura de secano. En contraste, para la agricultura de riego, los factores preponderantes son: no instalarse en zonas con erosión muy severa ($\beta=-12,91$), pero en suelos con profundidad moderada. Para las coberturas matorrales y pastizales las zonas de baja pendiente son el predictor más preponderante. Y finalmente, el factor predictivo más fuerte para la cobertura suelo desnudo son las zonas predominadas por suelos profundos y la distancia a los caminos (Ver Apéndice 6).

Por otra parte, los resultados obtenidos con el clasificador de tipo *random forest* muestran ajustes óptimos para todas las regresiones, con excepción de la clase suelo desnudo (12,73%), la cual debido a la pequeña superficie que ocupa con respecto a la superficie de la cuenca (0,037%) resulta difícil de predecir. En el Cuadro 8 se muestran los porcentajes de varianza explicada por el algoritmo *random forest* para cada una de las clases de uso de suelo.

Cuadro 8. Varianza explicada porcentual explicada para cada modelo de regresión.

	Clases de uso de suelo						
	Bosque nativo	Agricultura de secano	Plantaciones forestales	Matorral	Pastizal	Suelo desnudo	Agricultura de riego
Varianza explicada [%]	59,76	53,72	70,93	59,71	58,71	12,73	61,91

Finalmente, la comparación entre los modelos de regresión logística y *random forest* muestran que el segundo algoritmo incrementa la capacidad predictiva del modelo de regresión para todas las categorías simuladas. Lo anterior, queda corroborado principalmente por la información entregada de la representación gráfica de las curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*) (Ver Figura 4), ya que para todas las categorías *random forest* logra una mayor tasa de aciertos. En consecuencia, *random forest* es el algoritmo elegido para la simulación espacial en CLUE-s.

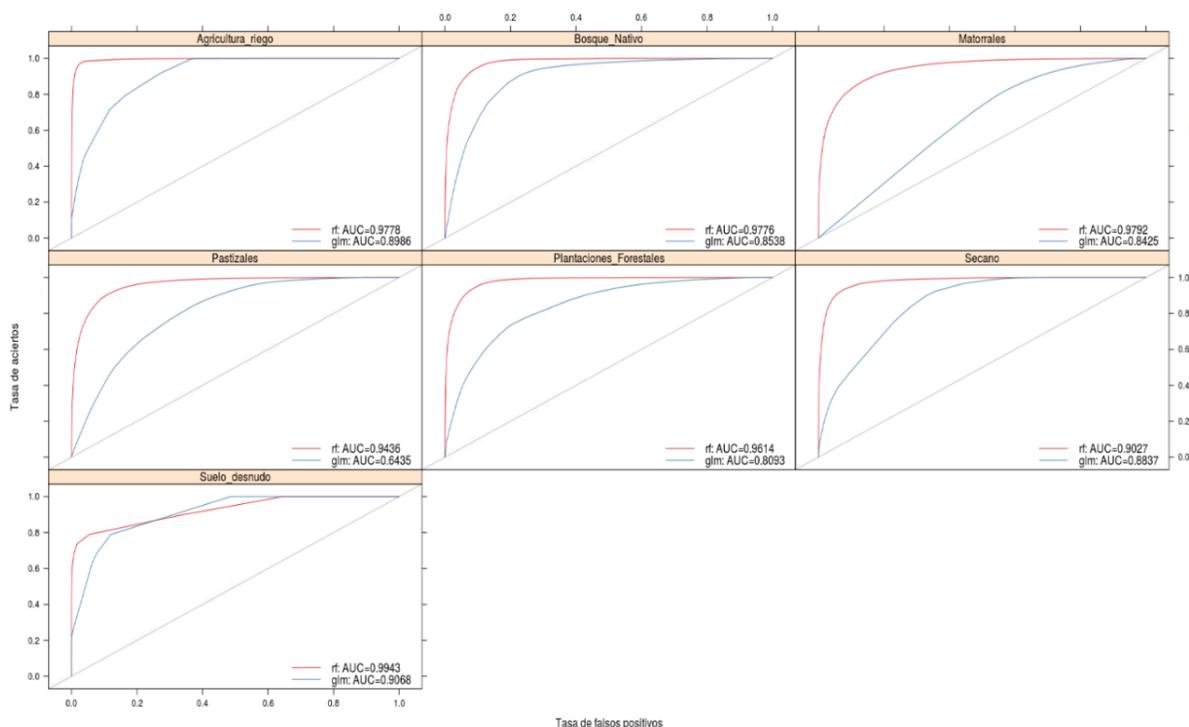


Figura 4. Curvas ROC correspondientes a las regresiones *random forest* (“rf” en rojo) y logística (“glm” en azul). En el eje de las abscisas se representa la tasa de falsos positivos, y en el de las ordenadas la tasa de aciertos.

Proceso de calibración y validación del modelo espacial.

En esta fase el modelo CLUE-s se ejecuta de manera manual e iterativa modificando los coeficientes de elasticidad hasta la obtención del resultado con mayor *Fuzzy Kappa Simulation* (FKS = 0,197). Sobre este aspecto, el vector de elasticidades que optimiza el resultado del FKS es de: 0,9 – 0,5 – 0,7 – 0,2 – 0,5 – 0,4 – 0,3, para las clases: bosque nativo, agricultura de secano, plantaciones forestales, matorrales, pastizales, suelo desnudo y agricultura de riego, respectivamente (Ver Figura 5). La similitud promedio obtenida entre el mapa de coberturas del año 2018 y su homólogo simulado es del 77,4%.

La revisión del índice estadístico $K_{posición}$ muestra el acuerdo por clase y permite establecer en cuales categorías la predicción puede ser atribuida al azar (-1) o a una correcta simulación (1). En esta aplicación en particular, los $K_{posición}$ obtenidos para el suelo desnudo muestran que para esta categoría la asignación es atribuible a la aleatorización ($K_{posición} = 0,012$). No obstante, esta no es la única fuente de error dentro de la modelación; categorías como los pastizales y matorrales también presentan bajos indicadores de $K_{posición}$, 0,516 y 0,5 respectivamente.

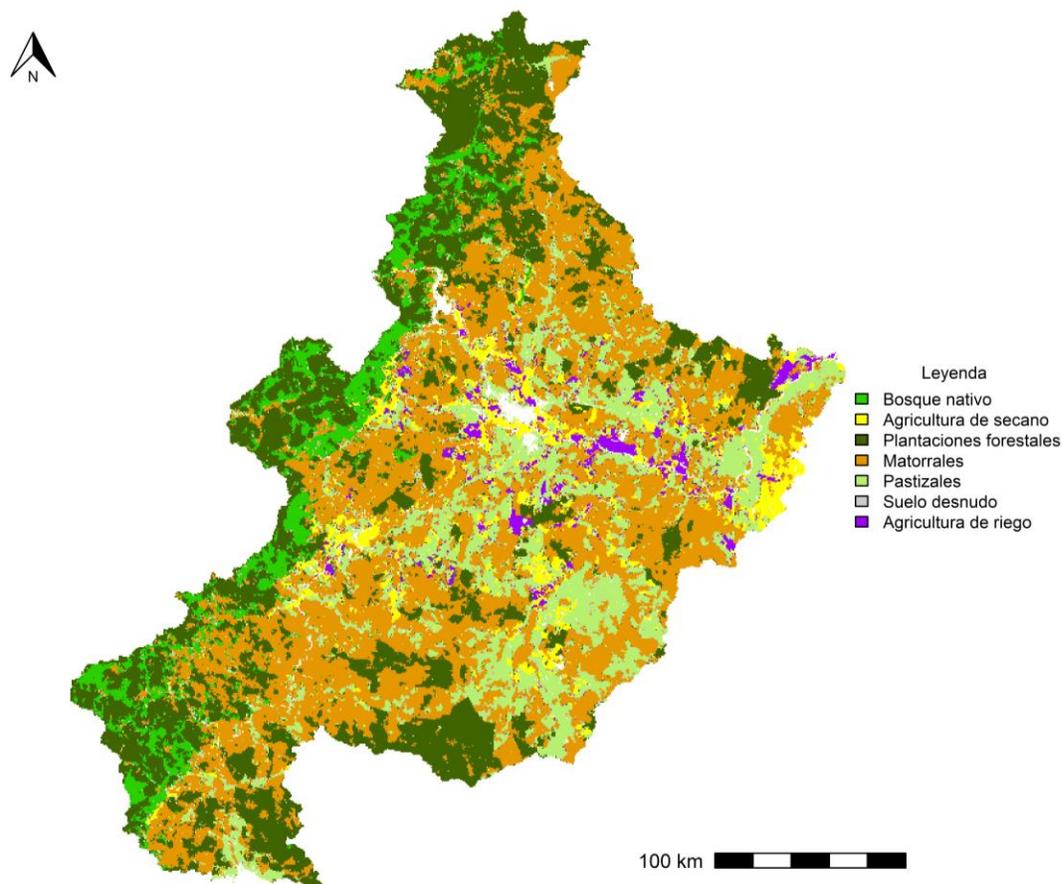


Figura 5. Mapa de coberturas simulado por CLUE-s para el año 2018⁸.

Otra forma de evaluar el rendimiento estadístico de la simulación es mediante una técnica que evalúa a distintas escalas espaciales las fuentes de acierto o error, llamada “comparativa a tres mapas”, considerando cinco categorías en las cuales es posible clasificar un error o acierto (Pontius *et al.*, 2011). En este caso, se contrasta con resoluciones espaciales menores a la inicial (120 m, 150 m y 200 m). Para ello, se utilizan los dos mapas observados y el simulado para una comparativa conjunta, obteniéndose también datos tabulados más detallados sobre las distintas fuentes de acierto o error (Ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Variación del error/acierto de la simulación a distintas resoluciones espaciales.

	Desaciertos (α)	Asignación acertada (β)	Asignación falsa (γ)	Falsa alarma (φ)	Persistencia simulada correctamente (ω)
90 m	3,60%	7,37%	4,46%	1,25%	83,32%
120 m	2,76%	7,52%	4,25%	1,18%	84,28%
150 m	2,62%	7,96%	3,62%	1,22%	84,58%
200 m	1,74%	8,21%	3,00%	0,95%	86,10%

En la primera columna se muestran distintas opciones de resolución espacial en metros.

⁸ A partir de ahora referido como “Escenario Base” para contrastar con los otros escenarios.

A partir del cuadro anterior, es posible extraer el error relativo total, que se obtiene sumando $\alpha + \gamma + \phi$, o sea, 9,31% de la superficie de la cuenca posee error de en la simulación. Mientras que, para el acierto total relativo se suman $\beta + \omega$, que resulta en un 90,69% de acierto. Adicionalmente se observa una relación inversa entre la disminución de la resolución espacial y el acierto, es decir, que a menor resolución espacial incrementa la capacidad de predicción del modelo (β).

Análisis de las entrevistas

Gracias a las campañas de terreno y el trabajo remoto, 33 personas en total participaron en este estudio: 30 entrevistas y 3 académicos en un *workshop*. Todas estas entrevistas fueron clasificadas para su análisis de manera individual, empleando los criterios de diferenciación de formas epistemológicas propuestas por Muktharov y Gerlak (2013) que están resumidas en el Anexo 1. Adicionalmente, se presenta una cartografía que muestra referencialmente la distribución espacial dentro de la cuenca de las entrevistas realizadas (Ver Figura 6).

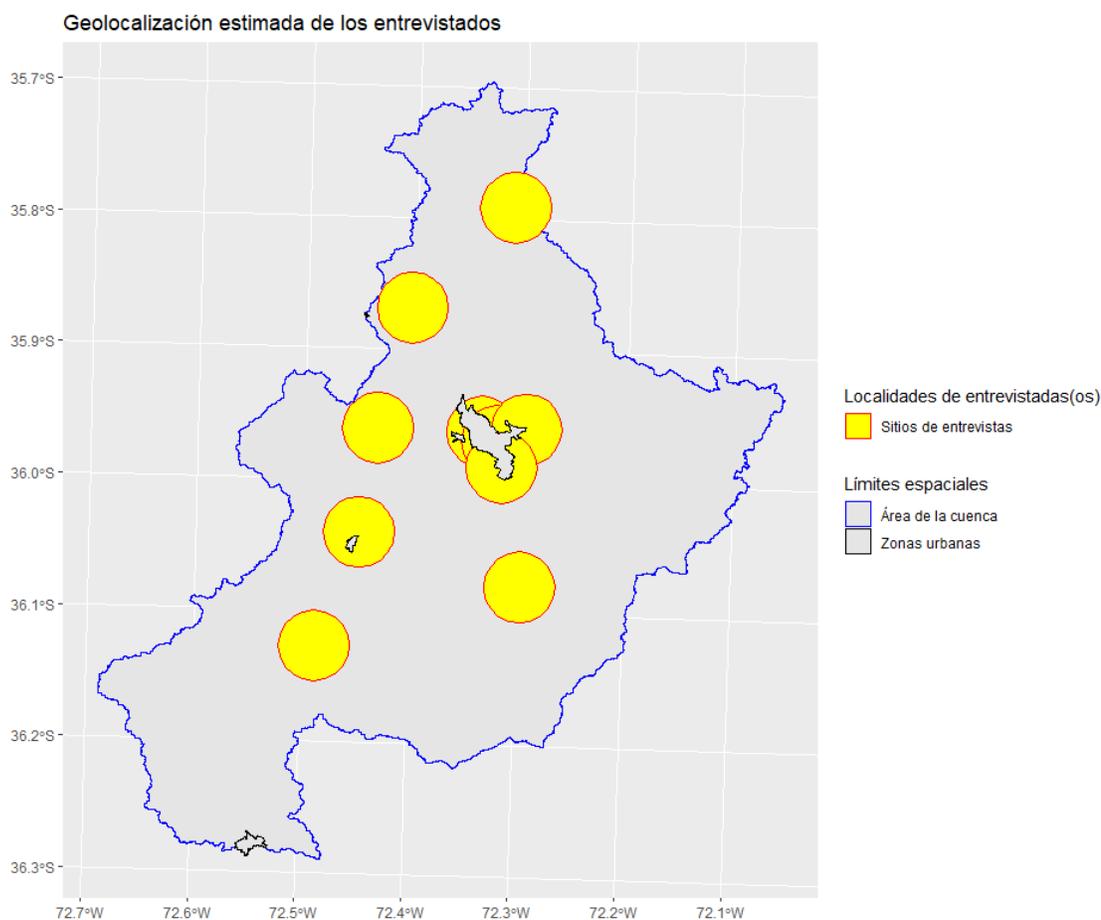


Figura 6. Geolocalización estimada de las entrevistas realizadas⁹.

⁹ Se presenta una geolocalización estimada para respetar la confidencialidad de los participantes.

En total, 21 de las entrevistas se clasifican bajo la forma epistémica discursiva. Dentro de este subgrupo la composición de género es de 9 mujeres y 11 hombres de edades que varían entre los 20 y los 75 años. Cabe destacar, que la relación de estos participantes con el territorio es diversa, por ejemplo: pequeños agricultores, presidente(a) de juntas de vecinos, agrupaciones ambientales, productores de carbón de espino y adultos mayores jubilados.

El subgrupo de la forma epistémica práctica se compone por 6 entrevistas; 5 hombres y 1 mujer. En este subgrupo todos los participantes poseen afiliación institucional en cargos de jefaturas que representan la visión de equipos de trabajos ligados de manera directa o indirecta con la gestión del territorio, a través de la elaboración de estrategias, planes y ejecución de proyectos en el sitio de estudio. Es por la razón anterior, que el tamaño de la muestra es reducido en comparación con la forma epistémica discursiva. No obstante, se considera representativa, ya que los participantes se expresan desde los objetivos y propósitos de sus instituciones respectivas.

Finalmente, el subgrupo de la forma prescriptiva está compuesto de las 3 entrevistas restantes y del *workshop* en el que participaron 3 académicos(as). La particular afiliación de los participantes entrevistados es un factor clave para la categorización de forma epistémica prescriptiva. Dentro del subgrupo, aparecen cargos como: director(a) de una ONG dedicada a temáticas de conservación de la biodiversidad en la cuenca, constituyente electo y un candidato(a) al cargo de concejal municipal.

A continuación, se detallan los principales aspectos identificados dentro de los relatos obtenidos.

Forma epistémica: Discursiva.

La forma epistémica discursiva posee una visión positiva sobre el pasado que, del futuro tendencial. Aspectos como las prácticas rurales son referidas como una opción viable de desarrollo local en lo económico y en lo social, ya que en la actualidad perciben pocos beneficios de la matriz productiva actual de la zona, justificado por la predominancia de los viñedos de riego.

En las zonas rurales, los entrevistados aluden a que, para poder visualizar cualquier futuro posible en la zona, es necesaria la intervención del gobierno central en materia de políticas públicas enfocadas específicamente en infraestructura y el desarrollo social. Adicionalmente, entrevistados adultos mayores hacen hincapié en el preocupante fenómeno migratorio campo-ciudad de los jóvenes debido a la falta de oportunidades en educación y trabajo, problemática que es expresada como elemento condicional de la existencia del campo en el futuro. Las siguientes 3 citas muestran estos argumentos.

(cita 1)

“Más facilidades para la gente pobre, tal como nuestros nietos, eso. Que se preocupen más de los campos, porque, sino se preocupan de los campos, la gente se va yendo a las ciudades y mucha gente en las ciudades, no van a hallar como vivir. En los campos está la facilidad pa’ trabajar, y eso es lo que se tiene que ser, es lo

principal. Más facilidades para los campos, más trabajo para los campos, más comodidad pa' las casas pa' los campos, más ayuda”.

(cita 2)

“Y dígame usted que: si sigue llegando gente, llegando gente, llegando gente, haciendo esas inmobiliarias grandes, haciendo edificios... acá llegando, que llegue gente, que llegue gente, ¿Qué hace toda esa gente? Sí el trabajo está en los campos. La comida está en los campos, no está en las ciudades. Hay tanto campo en Chile que... que la gente pueda trabajarlo, que pueda hacer estudios, puede trabajar, puede... Chile debía ser un país sustentable, debía ser, debería ser que nos mantuviera con lo que Chile da. Eso debería hacer la gente, dedicarse a trabajar, uno a poner la mente y otro a poner el trabajo”.

(Cita 3)

“Me encantaría que vivieran acá pa' que siguieran las tradiciones de uno. Porque ya la gente se está yendo toda pa' los pueblos y se está acabando lo que es la parte rural po'. Por eso mismo la gente está vendiendo todos los, sus terrenitos, aunque sea poco. Se lo está vendiendo a los empresarios, así a muchas empresas grandes y están acabando todo. Esas empresas grandes plantan puros pinos y eucaliptos. No saben otra cosa y eso acaba todo lo lindo que había antes po”.

Al momento de referirse a las eventuales propuestas que podrían servir para afrontar la sequía, aparecen ideas ligadas a la planificación territorial bajo la forma de mecanismos de control y/o regulación de los usos del suelo en sitios cercanos a los cursos de agua. En este caso, se le pregunta a una participante qué tendría que ocurrir para que incremente la disponibilidad hídrica, a lo cual responde:

(cita 1)

“...pa que hubiera agua, usted ve que las plantaciones tendrían que cómo que no estar hasta... Tendría que estar no se po', por lo menos a una distancia bien retirada de los montes”.

“¿De las fuentes de agua?”¹⁰.

“Si po'. De los montes¹¹, porque son los montes los que dan agüita, ahí se filtra el agua”.

(Cita 2)

“Cuándo usted dice los montes, ¿se refiere cómo a las montañitas que van quedando a los cursos de agua o de donde sale el agua?”.

“Donde salen las aguas y tendrían que estar bien lejos de las vertientes... Sobre todo, lo que es árbol, pino, todas esas cuestiones. Misma antes cuando yo llegué, uno miraba así y se veían robles, se veían de esos arbolitos y ahora usted ve puro pino po', pal lado que uno mire po”.

¹⁰ Todas aquellas citas alineadas a la derecha del texto corresponden a preguntas o menciones de los entrevistadores.

¹¹ Las expresiones “monte” o “montaña” se suelen emplear como aquellos sitios en donde existe vegetación nativa. En el caso de las plantaciones forestales, se les suele decir “bosques, forestales, los pinos” (ver Manushevich *et al.*, 2020).

Otro aspecto clave que caracteriza a la forma epistémica discursiva son los elementos éticos y valóricos que sustentan las argumentaciones. En las siguientes citas, se demuestra lo anterior al preguntar a los participantes sobre el rol que ejerce el mundo empresarial y el gobierno local en la problemática hídrica de la cuenca, específicamente, las consecuencias de las antiguas políticas forestales subsidiarias (DL N°701).

(Cita 1)

“...Pero aquí hay un pero grande. Dentro del presidente de las autoridades grandes y esos son los que están moviendo mal a nosotros por eso. Porque quieren pura plata no más y tratan de vivir lo mejor que pueden y plantan, plantan y como vuelvo a repetir no le hacen nada ellos y a uno no po’. Si van a hacer, si van a hacer, imagínese si ellos plantan 50.000 hectáreas de o sea empresas de pino o eucalipto, yo lo planto una hectárea no más po’ pa tener pa’ sobrevivir, por qué, porque es plata que de aquí a 20 años la tiene y uno está pensando en eso y ellos no, porque ellos lo único que quieren es riqueza no más. Además, que están ricos y no piensan en los demás (...) lo que hace el presidente, el presidente que no hace, por eso es que no quieren darle estudio a la gente, a los pobres por qué, porque resulta que ahora quedai para mí, están saliendo muchos destapados en las pillerías por decirle así, las pillerías que hacen. Por qué, porque todos nosotros los que no tenemos estudios somos inocentes, ignorantes a veces po’ y ahora las personas que estudiaron, salieron de la universidad y ya les cambió la vida y saben que es lo que están haciendo. Las mismas AFPs, imagínense que trabajan con la pura plata de los pobres, de los como uno y después le entregan lo que quieren y todo eso se hacen más ricos ellos po’”.

En la misma línea que la idea anterior, otra manifestación recurrente en la que aparecen los argumentos centrados en elementos valóricos y éticos, es cuando se hace referencia al Código de Aguas. Sobre este factor, la forma epistémica discursiva es crítica sobre la figura de propiedad del agua.

“El agua no tiene dueño, no pueden decir ellos ‘esto es mío’”.

Al consultar sobre las razones por las cuales creen que ha disminuido la disponibilidad hídrica, aparecen menciones al uso irregular de Derechos de Aprovechamiento de aguas por parte de empresas dedicadas a la producción vitivinícola industrial.

“Apenas se fundó la ciudad me imagino que empezaron las viñas, porque Cauquenes tiene esa identidad vitivinícola. De hecho, hay viñas en esta parte, y donde está el otro río, que es por el acceso a Cauquenes, también hay viñas. Pero el tema de que bajaran los caudales por estas viñas, hace poco. Bueno, la verdad es que la gente no lo vinculaba con eso. Pero hace pocos años se empezó a vincular, y se dieron cuenta que efectivamente, por lo visto, esa es la raíz de la baja del agua”

“Ósea, ¿antes la gente pensaba que el tema de que bajara el caudal del río era por otra cosa. ¿Y qué era esa otra cosa?”.

“Mira, la gente lo atribuía, en primer lugar, a cambio climático. Y también, lo otro, que igual ha sido notorio, que han bajado las precipitaciones. Igual en la ciudad,

antes era normal que en invierno se inundara por todos lados, y eso ha dejado de pasar, igual ha sido por baja de precipitación”.

Otro factor importante que caracteriza a esta forma epistémica es que fundamenta sus ideas a través de la utilización de informes y/o reportes de agua de amplia difusión, por ejemplo:

“Yo observo, con todo lo que uno va recibiendo, información de todo tipo, literatura, informaciones de los medios, qué sé yo, yo creo que también el ser humano está llegando a un límite, ya no va a avanzar más en el deterioro del planeta porque en todo el mundo, en todos los lugares que existen comunidades hay personas que están conscientes y están formando conciencia de que esto ya no puede seguir así”.

Con respecto a la visión futura del territorio, aparecen dos aristas, una que representa un futuro en el cual se sigue afrontando la problemática de la sequía con los instrumentos de planificación vigentes y que en este estudio se entiende como un futuro tendencial Y la otra visión futura que muestra un escenario notoriamente pesimista. A continuación, se muestran algunos ejemplos del futuro pesimista:

(cita 1)

“Esto se va a transformar en un desierto en no muchos años más si no hacemos algo pronto...”.

(cita 2)

“Si las cosas siguen como están, yo creo que aquí, como dice una persona que conozco, esta es una zona de sacrificio, o sea aquí nos vamos a ver todos mal, si la cosa sigue así. Como la ven”.

(cita 3)

“...hay un colega que jubiló hace como 8 años y conversaba con él yo, y me dice que encuentra que está todo casi igual, él lo ve. Los más antiguos van a decir que cambió el paisaje porque ya no hay trigo, por ejemplo, ya no hay trigo. Lo terrible sería, para mí, catastrófico, que siguieran incentivando a los agricultores a sacar las viñas, por ejemplo. Ahí cambiaría el paisaje de Cauquenes totalmente, y sí hay muchos lugares donde lo están sacando”.

(cita 4)

“Bueno, dicen que las forestales van a desaparecer cuando sea reemplazado el pino, cuando haya otro material que lo sustituya. La esperanza es que ojalá sea pronto, que no sea en 50 o 100 años más, porque con eso ya va a terminar la motivación de seguir plantando, o que haya un movimiento tan fuerte de las personas que de algún modo hagamos retroceder las forestales. Pero eso se hace sumamente difícil porque los votos que hay en el sector son muy pocos, y sin el apoyo político lamentablemente, porque la política tiene tomado todo. Sin el apoyo político, ¿qué se puede hacer?”.

Un factor relevante identificado que posee la visión deseada es que aborda diferentes temáticas según la afiliación y experiencias personales del participante, por ejemplo, en aquellos con afinidad hacia grupos ambientalistas, la visión de futuro deseado parte desde una arista institucional, generalmente proponiendo modificaciones a leyes controversiales, tales como, el Código de Aguas e incluso la figura de propiedad en la Constitución.

“...hay fe de cierta manera de que la nueva constitución pueda haber un cambio en la normativa y leyes del agua, en eso hay como un poco de fé... en todo lo que tu conversai con otras organizaciones que tú dices pucha ojalá estos locos puedan darle una solución a este tema. Yo creo que si el agua deja de ser privatizada por ahí podríamos estar hablando de un futuro cambio que puede ser realista”

En cambio, aquellos participantes que ejercen actividades en el mundo campesino plantean el futuro deseado desde la visión de un paisaje anhelado que alguna vez existió en su zona, y que vieron durante su infancia o que les fue transmitido por sus padres/abuelos. La conexión entre aquel paisaje pasado y el futuro anhelado es que en ese pasado la disponibilidad de agua no es un problema y eso facilitaba el desarrollo de sus actividades productivas. En esta parte de la narrativa se incorporan aspectos normativos y legislativos, expuestos como propuestas de solución para incrementar la disponibilidad de agua en su área.

“Lo que se podría hacer es que las empresas dejen de talar. Ahí tiene que ver la CONAF. Yo creo que ellos pueden hacer eso”

“¿crees que si llega CONAF hipotéticamente y pone más montaña mejore el tema del agua?”

“Si, harto. Sobre todo, en las partes donde hay eucaliptos. Si de ahí sacaran cierta cantidad de eucaliptos y colocaran algo más como canelo... llegaría más agüita”

Al momento de plantear durante la entrevista sobre cómo los participantes visualizan ese futuro deseado, las ideas más frecuentes dicen relación con limitar el avance forestal e incrementar la superficie de bosque nativo. El ejemplo anterior y estos son algunas menciones de esta materia.

(cita 1)

“...debería de acabarse un poco lo que es eucalipto y haber más árbol nativo no más po’, dejar el árbol nativo que vuelva a su normalidad”.

(cita 2)

“Pensemos que usted es el presidente por un momento ¿Qué hace usted con los pinos?”.

“Yo los terminaría”

(cita 3)

“Y para que la cosa se mantenga bien a futuro, pensemos así unos 50 años. ¿Qué cree usted que habría que hacer?”.

“Habría que repartir por plantar árbol nativo”.

En resumen, la forma epistémica discursiva plantea la existencia de dos visiones futuras probables: una pesimista y otra en la cual se mantiene el curso actual. También se identifica que el sentido de proteger y restaurar el bosque nativo no responde solo a incrementar la disponibilidad de agua en sus sectores, sino que está presente un factor fuertemente emotivo al recordar como eran sus localidades previo a la expansión forestal. Situación similar ocurre con el caso del vino de secano y el de riego, ya que, si bien reconocen que la producción de vino de secano es más compleja que la del vino de riego, esta conlleva un sentido de tradición dentro de la población adulto-joven y adulto.

Forma epistémica: Práctica.

En esta manera epistémica de comprender la problemática, la narrativa de los participantes se expresa mediante experiencias obtenidas de terceras personas y el análisis de información obtenida por equipos de trabajo. El uso de la tercera persona gramatical facilita la identificación de esta forma epistémica. Otro aspecto relevante es que la mayor parte de las respuestas se concentran en la aplicación de programas o proyectos de corto a mediano plazo, que es un factor característico de la forma epistémica práctica, por su lógica de concretización.

“...Aquí tengo también algunos usuarios en el sector de Pocilla, Lagunilla, Los Despacho...que ahí sí que hay escasez hídrica al punto de que ellos no tienen agua que se abre la llave, eso no lo tienen, dependen del camión aljibe. Entonces, si dependen del camión aljibe es porque realmente no tienen agua ni para beber. Entonces, la solución que le podemos dar es justamente que ellos hagan un pozo; y después se tiene que regularizar y todo, pero eso es parte también responsabilidad del mismo usuario, nosotros lo vamos guiando en ciertas etapas y ellos después tienen que ir resolviendo lo que se les va dando en el camino”.

Para la identificación de esta forma epistémica es clave prestar atención al énfasis que le dan los participantes a los elementos contextuales que son propios del territorio en el que se desenvuelven. Por ejemplo, en la siguiente cita, la entrevistada plantea que se ha avanzado en fortalecer que los pequeños agricultores trabajen cultivos que se adapten a la sequía, y que, al mismo tiempo, posean facilidades de financiamiento.

(cita 1)

“Dentro de los programas que manejo yo, estamos viendo tratar de usar cultivos que se adecuen a déficit hídrico y que sean rústicos”.

“¿Como cuáles?”.

“El cultivo de la lavanda y plantas medicinales, en eso estamos incursionando hace como 4 años. Y empezamos con el cultivo. Entonces las chiquillas tienen hortalizas agroecológicas, recolectan callampas, por ejemplo, hacen carbón, de todo un poco, y frutilla también porque ya en Chanco la montaña ya hay frutilla, ya llegó la frutilla, entonces tienen de todo un poquito más sus mil metros o quizás un poquito más de lavanda”.

(cita 2)

“Yo pienso que es vital ver cuáles son los cultivos que nosotros podemos manejar de aquí en adelante, buscar. Y buscar la forma de cultivar agua también, de proteger lo que tenemos, de donde no está forestado porque se quemó o que está forestado, y ir sacándolo e ir reestructurando toda la diversidad que había, se puede hacer algo, pero es difícil porque no todas las personas tienen la misma forma de verlo para el futuro, entonces por ejemplo si nosotros, por el secano interior, no podríamos tener muchas vacas, no tenemos muchas vacas, pero sí tenemos ovejas. Entonces ya po, no nos esforcemos por las vacas, sino que esforcémonos por tener alimento suficiente para esas ovejitas, que ese es el déficit mayor que nosotros... o sea, entre el ataque de perros y la falta de alimento, se autolimita la ganadería ovina”.

Al consultar sobre soluciones y propuestas de largo plazo para el sitio de estudio, todos los participantes representantes de instituciones gubernamentales concuerdan en que la clave para afrontar la sequía pasa por robustecer a los productores de vino de secano (“uva país”). No obstante, hacen hincapié en que no se pueden obviar las complejidades propias del lugar para fortalecer este rubro, que son: su inclusión dentro de un mercado dominado por la producción agroindustrial y la avanzada edad de aquellos productores que conocen y dominan las técnicas de producción de vino aprendidas de los colonos españoles. Por lo cual este es uno de los aspectos clave dentro de la visión de futuro de esta forma epistémica.

(cita 1)

“Pero las viñas...cuando tiene viña país¹², hay un servicio de asesoría que los aconseja para que no dejen el rubro, porque muchas personas a veces se van desmotivando y lo dejan, porque no pueden vinificar, como en los tiempos antiguos, el vino pipeño hace poco. Entonces se está buscando otras soluciones para que las personas tengan su propia empresa, o sean socio de alguna especie de cooperativa, y hay algunas”.

(cita 2)

“Nosotros sí tenemos usuarios en cooperativa, tenemos dos cooperativas vinícolas que están funcionando. Aquí también considerar, los usuarios son de la tercera edad sobre todo en las viñas, tienen extensiones grandes de viñas, pero hay muchos que son bien viejitos también, y algunos son orgánicos no por opción sino por condición, porque no pueden hacer mucho porque les compran la uva a 60 pesos, 80 pesos el kilo, entonces no hay retorno, a no ser que tengan estrategias de venta y cosas así, pero es difícil el rubro según mi punto de vista”.

Con respecto a las limitantes que los participantes identifican para lograr el futuro deseado, aparecen menciones a las condiciones del suelo y climáticas, debido a que se comprenden bajo un paradigma de optimización de los recursos naturales. En este último punto, predomina nuevamente la lógica de concretizar para atender una problemática urgente.

(cita 1)

“Entonces, la idea es eso. Sabemos que es rentable la frutilla porque el sistema también lo subvenciona, es rentable para nuestros agricultores, pero va a llegar un punto en que no vamos a tener el agua suficiente ni las condiciones del suelo para que sea fértil, porque al ir rotando en pura frutilla también se va acabando el suelo”.

(cita 2)

“Otra de las cosas que creo yo que es super importante en zonas como estas que vivieron solamente de la lluvia, no tenemos deshielos aquí, es alimentación de napas. Yo creo que a los acuíferos hay que ayudarlos porque si la gran mayoría de las lluvias se va a los esteros y a los ríos y al mar, podemos buscar la forma de hacer acumuladores de agua que hagan penetración en la tierra, mediante distintas metodologías de tal manera de ayudar al ecosistema en ese sentido”.

¹² “Viña país y uva país” son formas de referirse a la producción de vino de secano (sin riego).

Otra arista relevante para el futuro predicho (no es igual al futuro deseado), es el fenómeno de las parcelaciones, las cuales representan una nueva variable dentro de la problemática, a causa de que representan una presión sobre los suelos destinados para uso domiciliario, los cuales repercuten directamente en la demanda de agua. También se identificaron menciones a los incendios forestales ocurridos en la zona durante el año 2017, que son expresados como un factor de riesgo potencial ante las altas temperaturas detectadas durante en época estival. Nótese que en el segundo ejemplo la lógica de la concretización vuelve a aparecer como mecanismo para fortalecer argumentos.

(cita 1)

“Entonces cada parcela va a tener su pozo profundo, y va a terminar una parcela al lado de otra y van a terminar peleándose la misma napa y van a quedar los dos sin agua y de dónde van a sacar. Y en la playa, en la costa, pasa lo mismo. Está plagado de gente que tiene su segunda casa o su casa, que se vino por la pandemia a vivir acá de nuevo, o inventó su vida de nuevo acá, entonces ese tipo de cosas son como lo que sería catastrófico. Lo ideal para mí, sería que se fueran las forestales, y que volvieran los bosques nativos, ir restaurando, pero yo no soy tan exigente, solamente digo un cerro sí, un cerro no, un cerro sí, un cerro no, para que se mantenga el equilibrio y podamos tener más agua, porque el bosque nativo no necesita ser regado, por algo será. Entonces, yo creo que, si usáramos de esa forma mejor la forestería, sí, ahí a lo mejor recuperamos, y las cárcavas y todo el suelo que está súper erosionado también po, tratar de recuperar”.

(cita 2)

“Y ahora estoy peleando a ver si puedo ir a una reunión más adelante del plano intercomunal para proponer la creación dentro del Plan Regulador Intercomunal de una zona de seguridad perimetral a las ciudades. Para no volver a vivir experiencias como las del 2013 o 2017, en donde las llamas llegaron hasta las casas. Y eso es evitable. Es un cambio de conducta, es un poner de acuerdo a los instrumentos de planificación comunal. Porque generalmente se piensan en individual y así son espectaculares. Hay un dicho que dice que no hay mejor práctica que una buena teoría, y su contrapunto, otra cosa con guitarra”.

En contraste con la línea anterior, se les pregunta a los participantes sobre las medidas que tomarían para que ese futuro pesimista (fuera o dentro de los alcances técnicos que pueda tener su institución), y la respuesta se focaliza en la generación de nuevas políticas públicas en materia ambiental que sean aplicables a cada territorio y en reestructurar el rol de los municipios para atender con mayor eficiencia las problemáticas locales.

(cita 1)

“Políticas públicas medioambientales reales. Aterrizadas... claro que se hace la mención de algo, así como tú dices que recuperar que un cerro que antes fue nativo y ahora no, que podría volver a ser nativo, yo sé que es muy lento, ya por lo menos está, pero ese cerro pertenece a alguien yo supongo, tiene algún propietario, esa persona tendría que también cooperar”.

(cita 2)

“El Estado como director, como ente matriz debiese tener la capacidad de articular a través de lo que yo llamo el primer respondedor, el municipio. Que es el que está

ahí en la primera línea, articular distintos canales de acercamiento con la comunidad. Lo que según mi punto de vista debiese transformar a Chile en un país dividido en zonas”.

(cita 3)

“Me parece interesante que este ente esta empresa que se llama municipalidad tenga tantas atribuciones y a la vez ninguna”.

(cita 4)

“Yo creo que debiera modificarse la ley de bosques, disminuir la densidad por hectáreas de las plantaciones específicamente. Eso genera que se desarrolle silvicultura preventiva, que es el manejo del bosque para evitar su daño o que se quemé, porque sí yo le doy más luz al terreno, va a crecer pasto, y yo puedo pastorear ganado, el ganado va a abonar el terreno, se produce un ciclo”.

Como complemento de información para describir esta forma epistémica, también vale la pena mencionar las visiones del territorio que tiene el gobierno central, debido a que son las directrices de desarrollo por las cuales se encuentran trabajando diversas organizaciones estatales. De acuerdo con la Estrategia Regional de Desarrollo 2020, la imagen objetivo pretende que la región en su conjunto sea una potencia alimentaria y forestal.

“...Una Región rural-moderna, con tradición y futuro, que apuesta a convertir a Chile en potencia alimentaria y forestal en base al conocimiento, innovación y el emprendimiento, fruto de una sostenida articulación público-privada. Con una fuerte identidad regional asociada a su patrimonio histórico, natural y cultural, fortaleciendo así el desarrollo del turismo de intereses especiales y posicionando al Maule en el concierto nacional y mundial”.

En la misma línea que lo anterior, en el Plan Regional de Gobierno 2018 – 2022 la región es mencionada como el “eje silvoagricultor del futuro”, y para lograr dicha meta se ha elaborado una planificación estratégica en base a diagnósticos previos, los cuales pretenden atender problemas de conectividad vial con el puerto de Talcahuano para permitir a los mercados locales la exportación de madera. En paralelo, este plan involucra la creación de programas de asistencia técnica y mentorías especializadas para beneficiar la Industria Frutícola regional.

Finalmente, otro programa que propone una visión objetivo del territorio es el de “Gestión Territorial para Zonas Rezagadas”, el cual contiene una lógica de concretización y perspectiva dependiente del contexto, al comprender el problema como una situación puntual que se puede atender mediante la inversión en infraestructura y diversificando mercados locales. A la vista queda que estos tres Instrumentos de Planificación Territorial proponen una imagen objetivo que no corresponde a la escala fijada en este estudio.

“Propiciar el desarrollo económico y social del territorio contando con la infraestructura de soporte adecuada que permita que los sectores productivos se consoliden y diversifiquen, contribuyendo a un desarrollo integral ambientalmente sustentable e inclusivo”.

Forma epistémica: Prescriptiva.

Dentro de esta forma epistémica, una característica que es única con respecto a las otras dos formas epistémicas es que presentan definiciones claras sobre la problemática y sus eventuales soluciones. La razón principal de ello es que el diagnóstico y las ideas están acompañadas de conocimiento científico adquirido de manera directa como investigador. En este caso, se pregunta al participante sobre las desventajas del vino de secano en contraste con el vino de riego, nótese la persona gramatical utilizada.

“Las cepas nuevas que han llegado, las cepas nuevas, bueno, hay de todo hoy día, Petit Verdot, Cabernet, Merlot, y muchos muchos muchos. Lagrinac, Tempranillo, estamos llenos, llenos de cepas en esta zona, porque las tintas por el sol y el secano mientras menos grande sea la uva, o sea no tenga tanta agua, mejor son sus características como vino para la crianza, y para la reserva. Porque hay vinos que se toman rapidito, unos varietales, el tipo de vino francés que lo hacen con fermentaciones diferentes a las que hacen acá. Entonces, aquí bueno yo he hecho todo eso como investigación”.

Al consultar por la dinámica contextual que se dio en la zona para la potenciación de la agricultura de riego, aparece otro ejemplo claro de que el entrevistado presenta definiciones claras del problema.

“fue una política de gobierno, yo creo que no malintencionada, porque ellos seguían generalmente por las informaciones que le mandan las instituciones que están ligadas a la zona que se quiere ayudar, entiendes tú, al INDAP en este caso, pero ojo el INDAP dependía de consultoras, de consultoras que hacían la pega en terreno, entonces el INDAP le pagaba a las consultoras y la consultora le pasaba unos formatos, aquí atendemos a todos los viejos, aquí están las firmas. El INDAP le pagaba a las consultoras, entonces las consultoras no hicieron bien la pega en ese momento, consultoras políticas ¿no?, todas las consultoras que llegaban en esos tiempos acá venían con un sesgo muy político, muy político”.

Dentro de las respuestas sobre cómo creen que será la zona en el futuro, llama la atención que los participantes categorizados bajo la forma epistémica prescriptiva les es difícil visualizar un futuro con claridad. Para este grupo, primero es necesario concentrar esfuerzos en disponer de mayor y mejor información antes de comenzar a planificar o visualizar un futuro probable o deseado.

“Y a futuro, ¿usted cómo cree que se viene la cosa en Cauquenes, en unos 30 años?”.

“Aquí nosotros estamos haciendo una resistencia idiota nada más de cuál tiene que ser las proyecciones de las comunidades, y hay que intervenirlas no más, pero esa intervención va a necesitar de mucha energía para poder producir, y no sé de dónde van a sacar la energía, ¿entiendes? de dónde vas a sacar la energía. Hoy día estoy manipulando la energía del sol, del agua ya no tenía agua. Pero, la situación del agua, te digo, pasa por hacer catastros y qué es lo que quiero. O sea, yo estoy defendiendo el río, pero para qué defendiendo el río. ¿Para qué?”.

La identificación de un futuro deseado o probable también se vuelve compleja cuando se pregunta al grupo de académicos participantes del *workshop*. La siguiente cita muestra la respuesta de un participante ante la idea de plantear el futuro bajo distintos escenarios plausibles o no plausibles. En este ejemplo, también aparece una lógica instrumentalista, que también es una característica propia de esta forma epistémica, al plantear que las políticas públicas son un medio utilizable para conseguir un determinado fin.

“salgámonos de la idea de que los escenarios tienen que ser x probables, que es como la forma más clásica de proyectar como situaciones a futuro, porque justamente uno quiere intencionar que ciertas cosas ocurran aun cuando no sean probables que ocurran, de hecho tú quieres cambiar el peso para que ciertas metas se cumplan. Y yo creo que ahí la clave, ya sea cual sea el cómo se clasifica, o qué tanto, porque yo veo que esta clasificación tiene mucho que ver con qué tanta injerencia tú tienes; a partir del escenario qué tanta injerencia tú tienes en el presente para hacer cosas ahora. Puede ser como building capacities, o mover socialmente, o realmente como decir ‘esta es la política pública que tú tienes que hacer ahora para que en 30 años lleguemos a esta meta’”.

No obstante lo anterior, el grupo de académicos logra dar con una idea consensuada de planteamiento de escenarios en base a un trabajo conocido y publicado recientemente de Galleguillos *et al.* (2021), el cual propone plantear un escenario pristino para estimar la respuesta hidrológica de la cuenca y utilizarla como línea de base para otras comparaciones.

“...Está bien como tener una noción de la historia del lugar, pero a mí se me hace muy difícil imaginar algo si es que no sé para qué... ósea, si es que no tenemos claro primero, a dónde vamos. Cómo estamos, dónde hay problemas... sabemos... hacia dónde vamos, a dónde queremos llegar, y para eso, creo que lo más simple, sobre todo en Cauquenes que ya está recién salido el paper de Mauricio Galleguillos, es agarrarnos un poco, basarnos en eso y tratar de traducir los escenarios y las proyecciones que se hicieron para distintos escenarios, entenderlas como... ósea, ahí ya hay una cuantificación, ahí hay un diagnóstico del Estado actual, hay una estimación del estado futuro, y como que siento que por ahí puede ser más fácil agarrar la narrativa de los escenarios. Ósea, quizás ver esas proyecciones, y ver cómo calzan en un... qué significa esto, ósea, mirar, por ejemplo, de aquí al futuro, los 4 escenarios que puso Mauricio en su paper, y quizás con esos escenarios nosotros ya tenemos un final, o un 2050, que calza con metas de cierto tipo, o con situaciones”.

Finalmente, las ideas intercambiadas entre los académicos convergen en que el escenario debiese plantearse en función de asegurar la disponibilidad hídrica para consumo humano, sin que exista la necesidad de abastecer con camiones aljibes como se ha estado haciendo en la zona.

“Yo creo que el bienestar humano, yo creo que eso tiene que ser nuestra guía, el bienestar de la población, y hay ciertas métricas que propone FAO, de cantidad de agua por habitante que debería ser el mínimo, el "desde". Entonces la idea es que

todos los habitantes tengan esa agua sin tener que pasar por un camión aljibe estoy pensando, con el agua que le provee la propia cuenca. Algo de ese estilo estoy pensando yo”.

Escenarios de usos de la tierra

En las figuras (7 y 8) se resumen los resultados principales de las simulaciones espaciales correspondientes a cada escenario alternativo de usos de la tierra. Adicionalmente, en el Apéndice 7 se muestra una tabla comparativa que muestra las superficies asignadas a cada categoría por escenario.

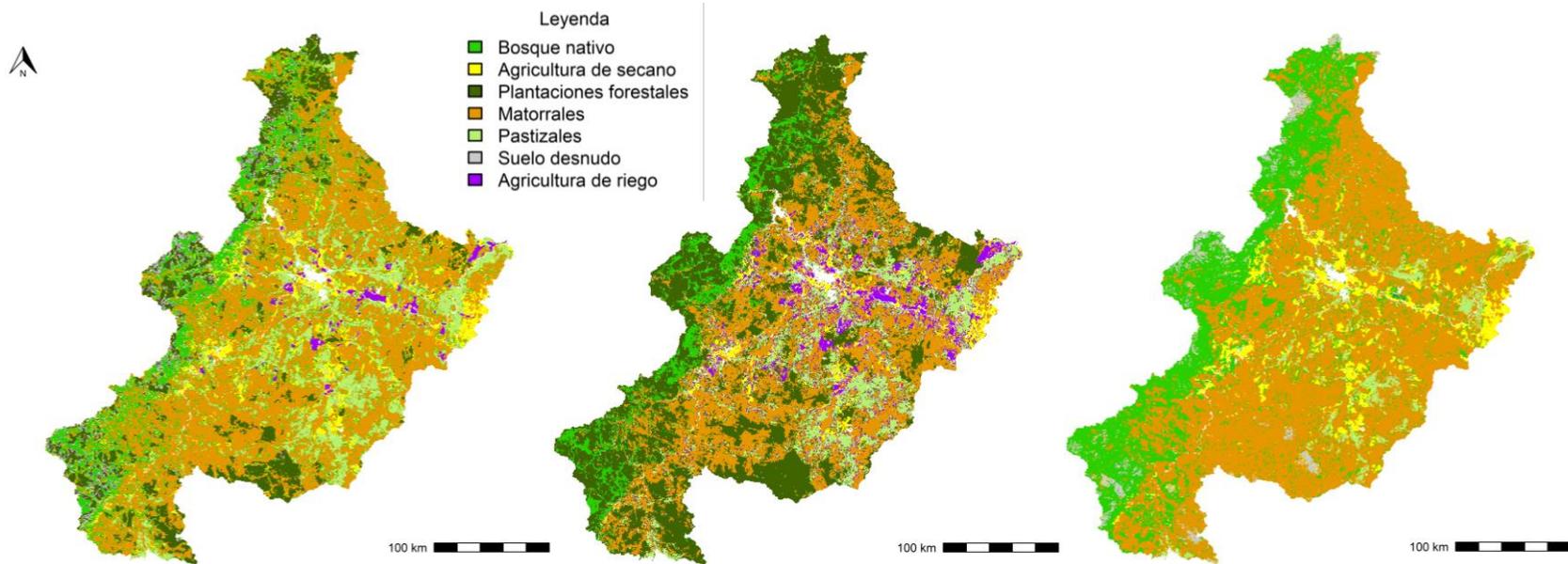


Figura 7. Escenarios de usos de la tierra simulados. De izquierda a derecha: Escenario Discursivo, Escenario Práctico y Escenario Prescriptivo.

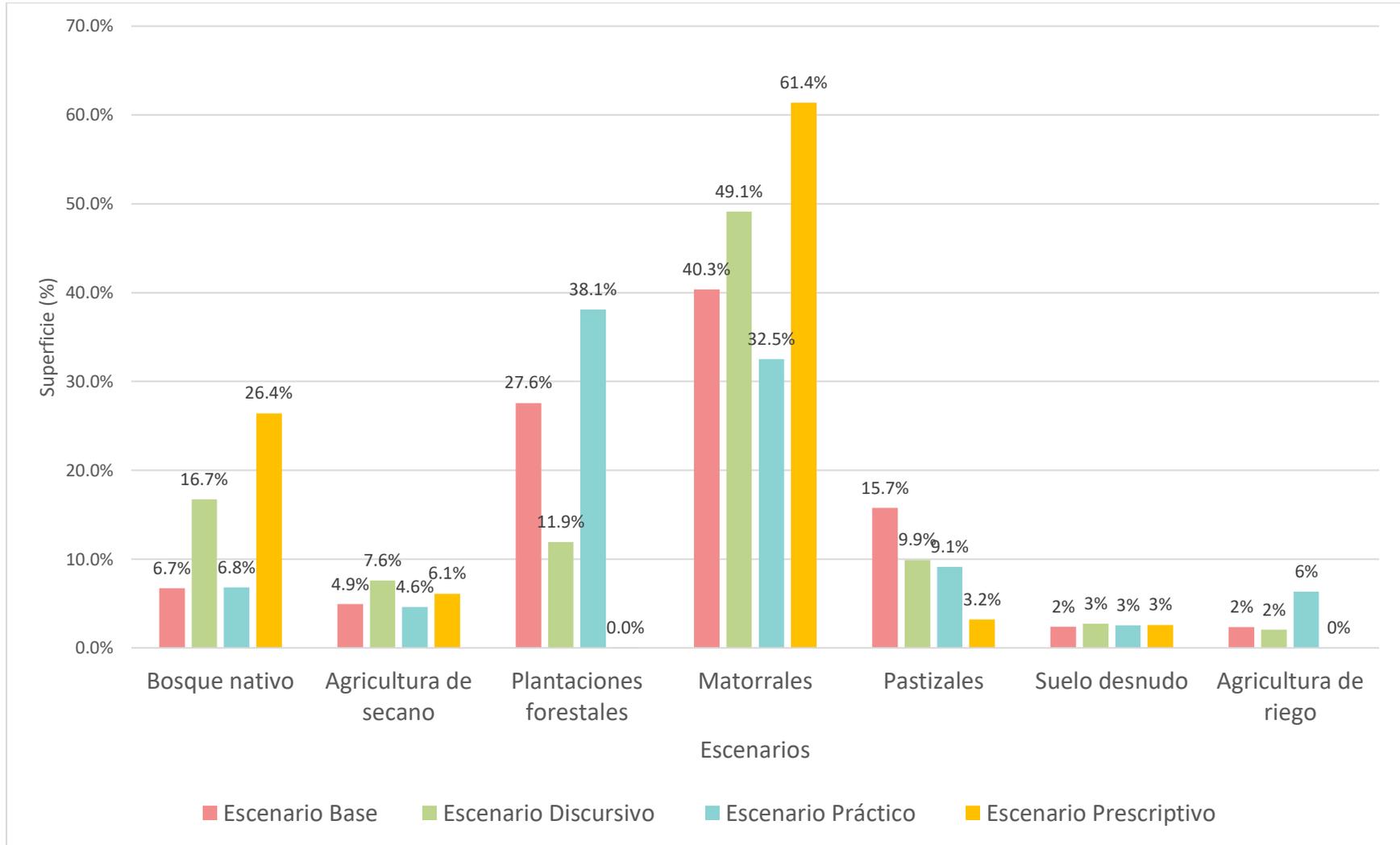


Figura 8. Resumen de superficies asignadas para cada escenario.

Escenario de uso de suelo basado en la forma discursiva

Una de las ideas fuerza que representan este escenario es poner a prueba la hipótesis de que las plantaciones forestales de pino y eucalipto serían la causa de la disminución en la disponibilidad de agua. Razonamiento que es consecuencia de contrastar áreas en las cuales la actividad forestal está fuertemente presente, versus zonas en las que abunda la cobertura vegetal nativa. En este último caso, los caudales y escurrimientos superficiales de agua aún logran mantenerse a pesar de verse afectados por la disminución de precipitaciones, mientras que en áreas cercanas a las plantaciones forestales la disponibilidad superficial y subterránea de agua es baja.

El rol que juega la producción de vino de secano dentro de este escenario es clave para el mundo campesino, puesto que, mediante los impulsos del gobierno central y local, se generarían condiciones óptimas para incrementar la demanda de trabajo en las zonas rurales de la cuenca, evitando así el fenómeno de emigración rural hacia las ciudades. No obstante, para que ello ocurra se debe restringir que las plantaciones forestales se sitúen en las cercanías de los cursos de agua, y en paralelo, promover la restauración de bosque nativo y matorrales según corresponda, no solo para afrontar la sequía, sino que como mecanismo de prevención de incendios.

La narrativa de los grupos ambientalistas dentro de este escenario se incorpora bajo una forma concreta: la protección y restauración del bosque nativo. La fundamentación de este subgrupo es que primero deben cambiar las “reglas del juego” en materia de gestión de los recursos naturales, ya que estas promueven y fomentan un enfoque basado en el extractivismo, y que ello sería la principal causa del deterioro ambiental. En materia de gestión del agua, su diagnóstico y propuestas son tácitas: el acceso al agua debe estar garantizado por ley y el Estado debe actuar como garante para que ello se cumpla. Cabe destacar, que dentro de este escenario existe una convergencia de ideas del mundo rural con los grupos ambientalistas, en el sentido de que proteger y restaurar el bosque nativo debe ser entendido como una prioridad para afrontar la sequía.

En términos de la simulación espacial, la incorporación de la variable forzante dentro del modelo logra correctamente identificar las plantaciones forestales situadas en un buffer de 1 kilómetro de los cursos de agua, y que además cumplan con las zonas en donde históricamente existió bosque nativo (Ver Apéndice 4). En total, la superficie de prohibición abarca 42.023 hectáreas, que es aproximadamente el 25% de superficie de la cuenca. Como consecuencia de esta nueva regla espacial, el algoritmo CLUE-s asigna el doble de superficie para bosque nativo al comparar el año 2004 (15.230 ha) con el escenario discursivo (29.610 ha).

Otro pilar argumentativo de este escenario es el rol de la matriz productiva agrícola. La cual dice relación con volver a como era antes la agricultura a través del fortalecimiento del vino de secano y la limitación de la agricultura de riego. De manera referencial, la estimación de la superficie agrícola en Cauquenes para el año 1990 es de 13.500 ha, y aquel valor es utilizado como superficie demandada en este escenario. Finalmente, el modelo espacial

simulado para este escenario se muestra en la Figura 7, y a continuación, los detalles de asignación correspondientes a las categorías simuladas se muestran en el Apéndice 8.

Escenario de uso de suelo basado en la forma Práctico

En el escenario práctico, existe una divergencia entre las narrativas del gobierno local con las del gobierno central. El gobierno central promulga y defiende políticas de desarrollo que fortalecen las condiciones para transformar no solo el área de estudio, sino que la Región del Maule en una “potencia agroexportadora”, esto a pesar de la baja disponibilidad de agua a causa de la megasequía. En cambio, la administración local recientemente electa (año 2021), propone plantear un modelo agroecológico de bajo impacto en términos de utilización del recurso hídrico y potenciar el vino tradicional de secano como el eje clave del agroturismo. Dado que las políticas, planes y estrategias del gobierno central ya se encuentran en marcha, se opta por simular aquel futuro escenario dado su mayor probabilidad de ocurrencia.

La mirada de desarrollo futura propuesta por el gobierno central plantea tácitamente la potenciación del rubro forestal, al poner en marcha proyectos para conectar vialmente Cauquenes con el puerto marítimo de Talcahuano, lo cual se traduciría en un importante incremento en la demanda de madera dentro del sitio de estudio. Asimismo, se considera que la ganadería no es un factor relevante dentro de este escenario al no identificarse menciones con respecto al tema.

La protección de la biodiversidad también es un eje clave dentro de este escenario, pero desde el enfoque de la regeneración pasiva del bosque nativo y del matorral. Por lo cual, en términos de la simulación se ingresa bajo la forma de continuar con las dinámicas de vegetación actuales (regeneración natural). Es importante tener en cuenta que esta última idea fuerza se contradice con la de favorecer la exportación de madera, debido a que el incremento de las plantaciones forestales significa un efecto directo sobre los matorrales e indirecto sobre el bosque nativo.

En resumen, las ideas anteriores suponen un incremento en la demanda forestal y de tierras para producción agroindustrial, principalmente de uva para vino de exportación, en desmedro del matorral y los pastizales, los cuales se ven reducidos en un 7,83% y 6,63% respectivamente. Al mismo tiempo, los bosques nativos incrementan levemente su superficie gracias a la regeneración pasiva (6,71% a 7% aproximadamente). La Figura 7 muestra el resultado final de la asignación espacial para este escenario, junto con ella, se adjunta el Apéndice 8, que resume los cambios relativos para cada superficie.

Escenario de uso de suelo basado en la forma escenario Prescriptivo

Este escenario es una representación de las ideas planteadas por personas ligadas al mundo de la ciencia e investigación. Las ideas fuerza dicen relación con imaginar un futuro probable en donde la cuenca es capaz de abastecer la demanda de agua para los ecosistemas y de uso humano, ya que es una manera directa de mejorar indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Prevenir situaciones de Inseguridad Hídrica es la propuesta central de este escenario. A razón de ello, se ha planteado la idea de evaluar hidrológicamente la cuenca en su estado más prístino, lo cual significa reemplazar las plantaciones forestales con matorrales y bosque nativo bajo el criterio de los pisos de vegetación. Aquella propuesta planteada por este escenario se incluye en el modelo bajo de la forma de una variable forzante (Ver Apéndice 8).

La hipótesis principal del Escenario Prescriptivo es que la disponibilidad de agua en la cuenca incrementa bajo una condición en donde la vegetación se restaura por completo. Para ello, el planteamiento lógico de este escenario requiere no solo revertir el avance de la actividad forestal, sino que también deben replantarse las técnicas agroindustriales para potenciar cultivos y frutales de bajo consumo hídrico. Para comprobar aquellas hipótesis, en este escenario se asumirá que la superficie ocupada por plantaciones forestales es nula, debido a que no cumplen con representar un estado prístino de la cuenca. Al mismo tiempo, se debe asumir que toda la actividad agrícola en la zona se ejerce sin técnicas de irrigación, es decir: se asume que la agricultura debe ser de secano para poder corroborar la hipótesis de este escenario.

La Figura 7 muestra el resultado de la simulación espacial para este escenario, y el Apéndice 8 compara las superficies asignadas entre escenarios.

Modelación hidrológica

A continuación, en la Figura 9 se presentan los resultados del periodo de calibración (1996-2014) y periodo de verificación (1986-1995 y 2015-2020) para la simulación hidrológica ajustados a escala mensual. Cabe destacar, que los valores de KGE y KGE-García para el periodo completo alcanzan los valores: 0,88 y 0,65 respectivamente, lo cual significa que el modelo hidrológico fue capaz de simular exitosamente la respuesta hidrológica de la cuenca para los caudales altos y bajos (Ver Cuadro 10). Aunque, es importante mencionar que el desempeño del modelo se ve reducido cuando se trata de representar el comportamiento de los caudales bajos (KGE-García).

Cuadro 10. Parámetros KGE y KGE-García.

Periodo	KGE	KGE-García
Calibración	0,85	0,66
Verificación	0,91	0,64
Completo	0,88	0,65

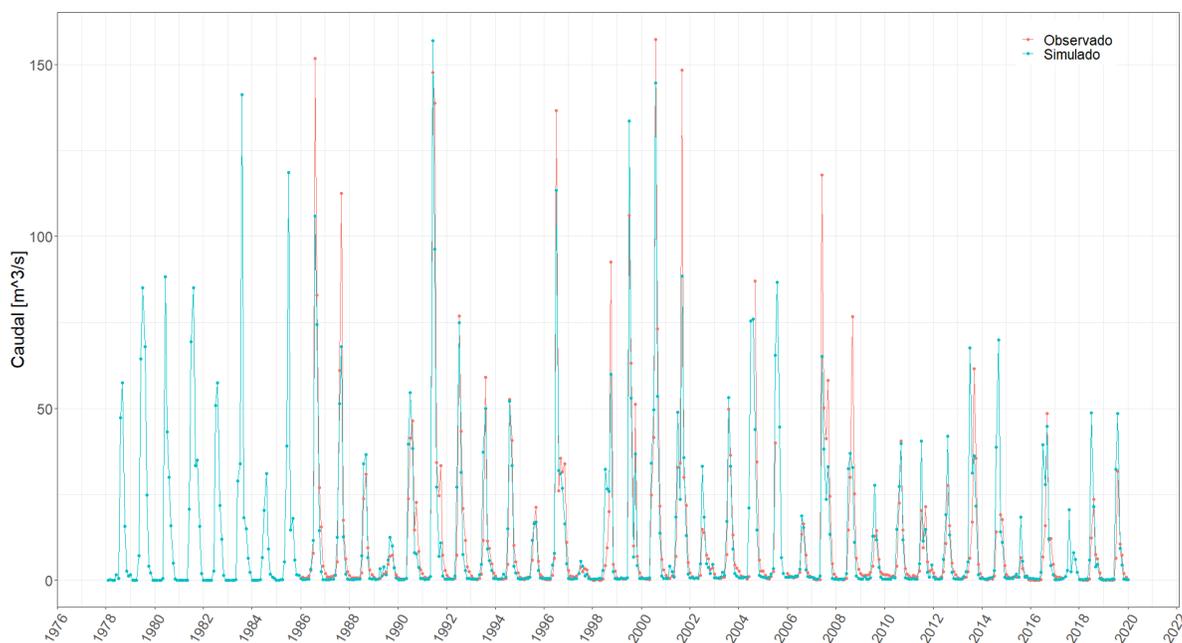


Figura 9. Modelo hidrológico SWAT+.

En total, las series de tiempo simuladas por SWAT+ arrojaron 2.016 datos de caudales a escala mensual desde 1979 hasta el 2020. Las cuales, al ser filtradas por el periodo estival dentro de la megasequía, se obtienen 132 registros. Asimismo, al contrastar los caudales medios mensuales de los escenarios, versus el obtenido por el mapa de coberturas simulado

del año 2018¹³, se produce una disminución en la provisión de agua en todos los casos, llegando a valores mínimos en el Escenario Práctico (Ver Cuadro 11).

Cuadro 11. Caudales medios mensuales correspondientes a cada escenario.

	Escenario Base	Escenario Discursivo	Escenario Práctico	Escenario Prescriptivo
Enero	0,670	0,623	0,499	0,505
Febrero	0,763	0,711	0,539	0,602
Marzo	0,779	0,729	0,584	0,621

Valores expresados en m³/s

Al observar la serie de tiempo anual de los caudales simulados (Ver Figura 10), es posible desprender que la disminución en la respuesta hidrológica ocurre a partir del año 2015. En todos los escenarios se visualiza una tendencia a la baja con respecto al Escenario Base, en el Escenario Práctico destaca el valor mínimo de 32,35 m³/s durante el año 2016. No obstante, durante el periodo 2014 – 2016 los valores máximos se producen en el Escenario Discursivo y es en aquel periodo el único caso en donde los caudales se ven incrementados con respecto al Escenario Base.

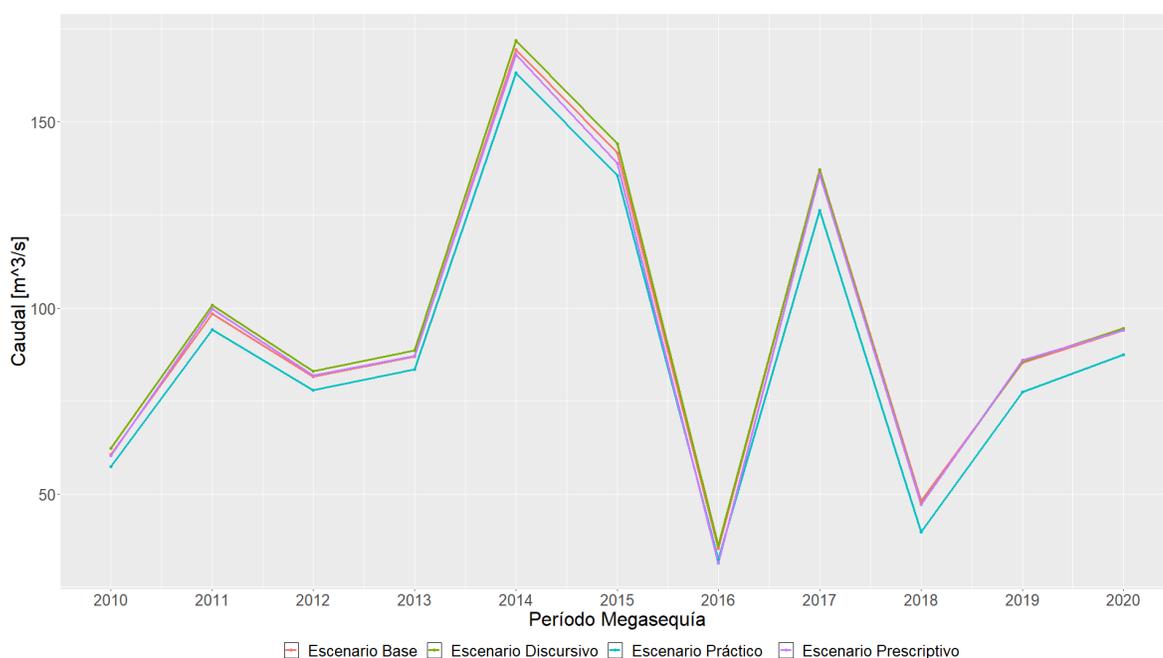


Figura 10. Simulación hidrológica en escala anual

Si se comparan las medias anuales, en orden descendente, los caudales simulados corresponden a: Escenario Discursivo, Escenario Base, Escenario Prescriptivo y Escenario Práctico, con valores 95,6 – 94,4 – 93,6 – 88,6 (m³/s) respectivamente. Por lo tanto, se puede afirmar que la aplicación del Escenario Discursivo habría significado un incremento 1,2 m³/s

¹³ Utilizado como referencia para el contraste con los otros escenarios (mencionado como “Escenario Base” o “Simulado CLUE-s” en adelante).

en promedio la disponibilidad anual de agua en la cuenca durante el periodo de megasequía, mientras que el Escenario Práctico reduce este mismo indicador en $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Al contrastar los escenarios en función de las estaciones del año, las diferencias estadísticamente significativas se presentan sólo en periodo estival (Ver Figura 11). En el caso del Escenario Práctico nuevamente se producen los valores mínimos para la media, mínimo y máximo, repitiéndose la misma tendencia a la baja obtenida a escala anual.

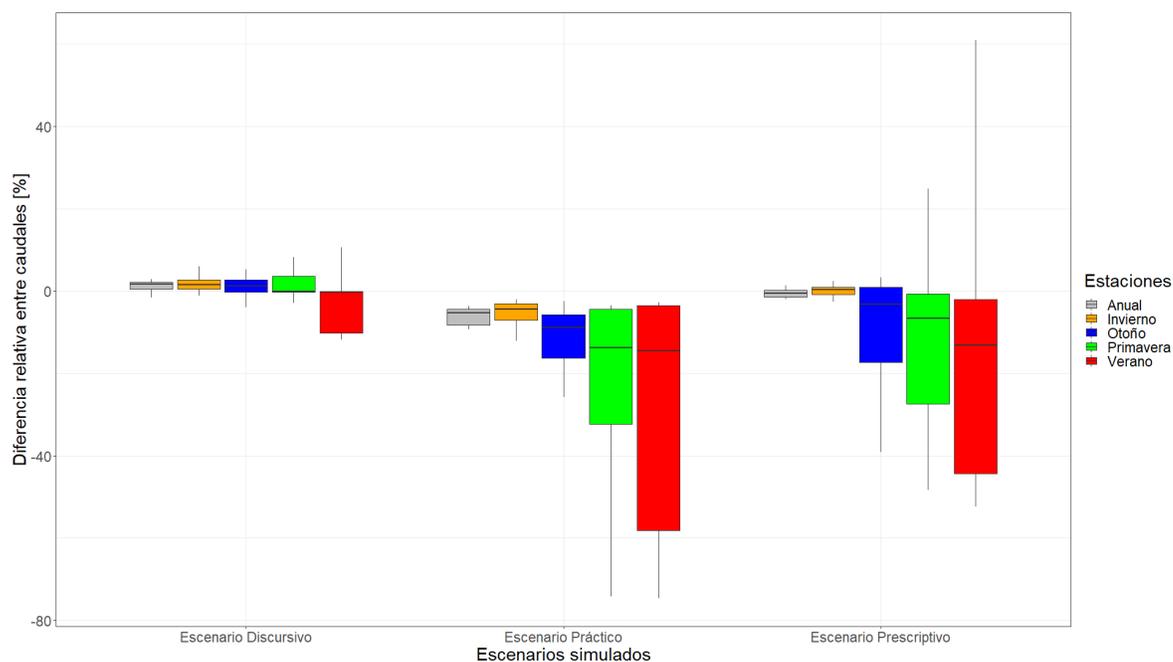


Figura 11. Cambio porcentual relativo de los caudales para cada escenario

Otro resultado obtenido a partir del modelo hidrológico son los consumos de agua de cada cobertura, los cuales son representados por la Evapotranspiración real (ET_r) y que en esta aplicación muestran requerimientos de agua similares entre algunas coberturas para el periodo de megasequía: 1) plantaciones forestales y el bosque nativo y 2) agricultura de secano con agricultura de riego (Ver Figura 12). No obstante, si se considera la superficie abarcada por cada cobertura en la cuenca, los consumos netos muestran que durante todo el periodo de megasequía, las dos coberturas con mayores requerimientos hídricos son las plantaciones forestales y los matorrales (Ver Figura 13).

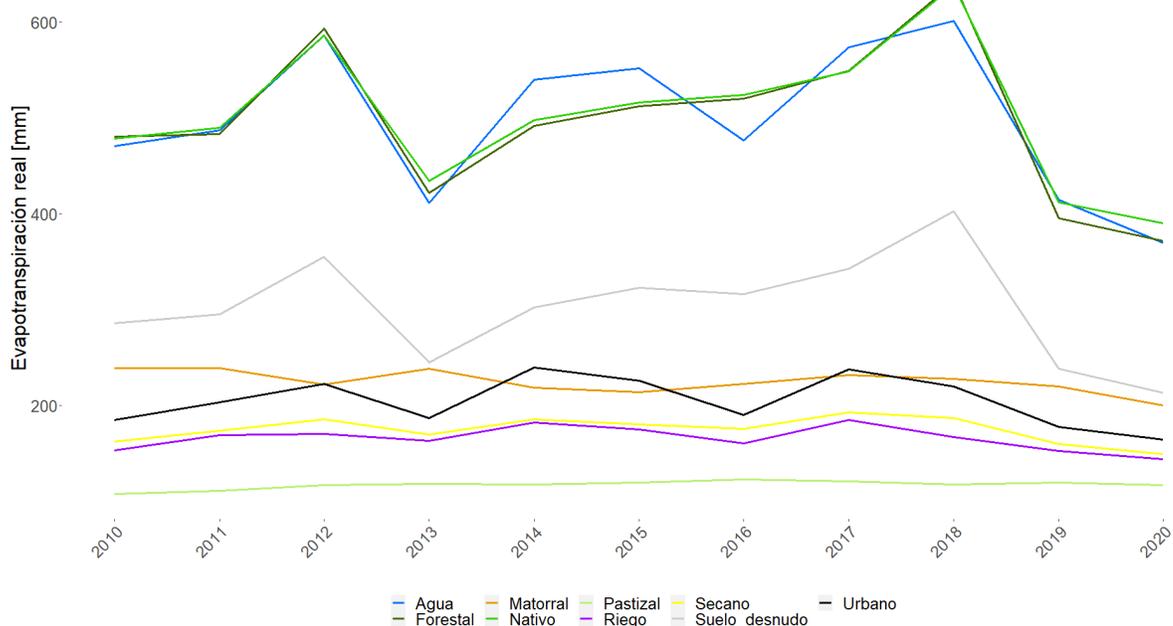


Figura 12. Evapotranspiración real (ETr) estimada para cada cobertura.

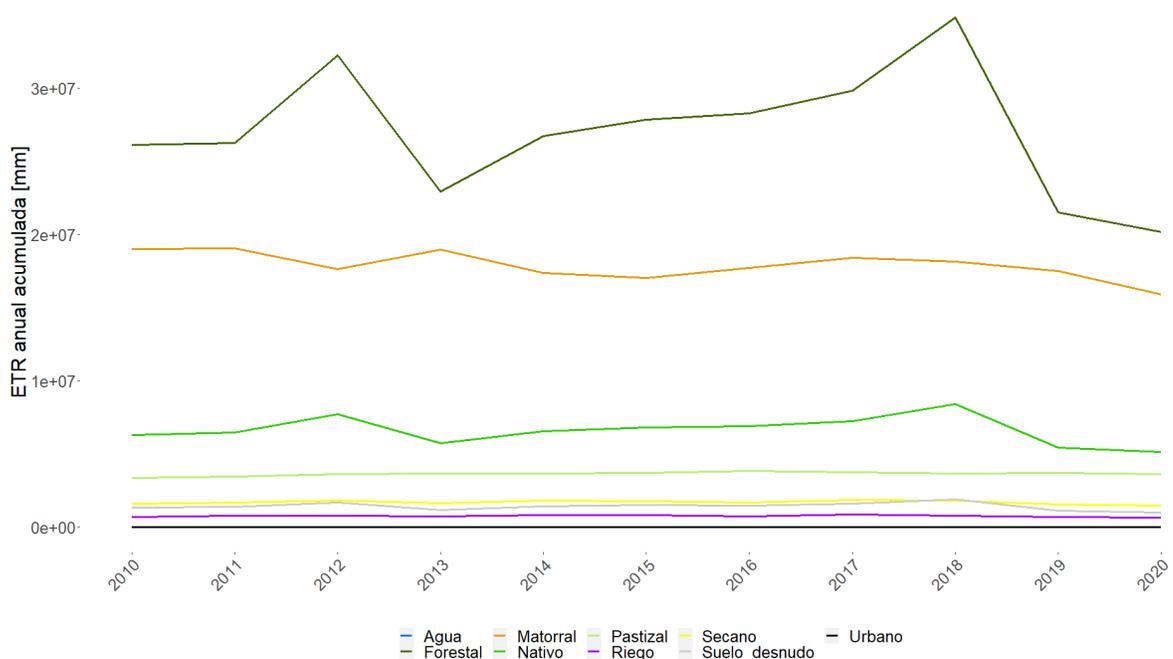


Figura 13. Evapotranspiración real acumulada (ETr) estimada para cada cobertura.

Una forma de comparar y comunicar las diferencias obtenidas entre los escenarios, es establecer su cuantía en términos de la demanda total de abastecimiento de agua potable en la cuenca y de la capacidad del Embalse Tutuvén (Ver Cuadro 12). En ese sentido, los resultados arrojan que, si consideramos la media de los caudales a escala anual, bajo la aplicación del Escenario Práctico el volumen de agua perdido sería el equivalente a completar

completamente la capacidad del Embalse Tutuvén¹⁴ 8,3 veces. No obstante, si se realiza el mismo cálculo para el Escenario Discursivo, la disponibilidad de agua incrementa en 1,72 veces la capacidad del embalse (Ver Cuadro 12).

Al contrastar las medias de los caudales de los Escenarios (para el periodo estival), con respecto al Escenario Base, se obtiene que en todos los casos la provisión de agua disminuye, lo cual llevado a la cantidad de veces que sería posible suplir la demanda total de agua potable entregada por camiones aljibes en la cuenca; significa una reducción entre 244 a 914 veces (Ver Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparativa en unidades volumétricas.

	Caudal promedio anual [m ³ /s]	Capacidad del Embalse Tutuvén	Media periodo estival	Demanda de agua potable total
Escenario Discursivo	96,6	1,72	0,69	-244
Escenario Práctico	88,6	-8,31	0,55	-914
Escenario Prescriptivo	92,9	-1,46	0,57	-788

Diferencias estadísticamente significativas entre los caudales de los escenarios.

En términos estadísticos, la prueba HSD de Tukey establece la existencia de dos casos en los cuales se produce una diferencia significativa entre los caudales estivales con un 95% de certeza.

1. Escenario Base – Escenario Práctico: en este caso, el valor de *p-value* ajustado para la prueba estadística es igual a 0,013.
2. Escenario Base – Prescriptivo: en este caso, el valor de *p-value* ajustado para la prueba estadística es igual a 0,043.

Adicionalmente, en el Cuadro 13 se presentan los resultados de la prueba HSD Tukey para todos los casos posibles.

Cuadro 13. Comparativa HSD de Tukey entre los escenarios simulados.

Escenario		<i>p-value</i> ajustados
Prescriptivo	Práctico	0,9734
Discursivo	Práctico	0,1114
Base	Práctico	0,01302*
Discursivo	Prescriptivo	0,2605
Base	Prescriptivo	0,0431*
Base	Discursivo	0,8457

El signo * muestra los casos detectados con diferencias significativas.

¹⁴ Tener en cuenta que la capacidad del Embalse Tutuvén es de 22.000.000 m³

Adicionalmente, se presenta una manera gráfica de comprender las diferencias identificadas por la prueba HSD de Tukey (Ver Apéndice 9). Por ejemplo, al contrastar las diferencias entre los caudales estivales del Escenario Prescriptivo con el Escenario Práctico, se obtiene que los caudales simulados son similares ($p\text{-value}=0,9942$). Otro caso interesante se produce al contrastar los Escenarios Discursivo y Práctico, ya que, si bien no se detectaron diferencias significativas, lograron valores cercanos al umbral de significancia.

DISCUSIÓN

Modelación espacial y diseño de los escenarios

El ajuste de los modelos de regresión logística y *random forest*, lograron una adecuada capacidad predictiva, a excepción de la cobertura Suelo Desnudo. La razón principal es la baja cantidad de observaciones detectadas para esa categoría. Otro aspecto por considerar es que en general los modelos de simulación de LULCC no son capaces de asignar categorías a un píxel que en la realidad ha sufrido de un cambio de tipo estocástico (Brown *et al.*, 2013; Moulds, 2015); o, dicho de otra manera, cuando el cambio se produce por una fuerza externa que no ha sido incluida dentro de las variables que explican los patrones espaciales. Sobre esta misma materia, otras investigaciones han encontrado diversas fuentes de incertidumbre, tales como: incendios y deforestación, las cuales son ejemplos de cambios estocásticos. En este caso de estudio, es posible encontrar ambas fuentes de incertidumbre, ya que el mapa de coberturas utilizado para la validación del modelo CLUE-s, que es representativo del año 2018, contiene los efectos causados por los incendios que afectaron el área de estudio durante el año 2017. Otra fuente de incertidumbre dentro de la modelación espacial, son aquellas categorías que son complejas de predecir, como los matorrales y pastizales, pues ambas son difíciles de distinguir por el satélite debido a su similitud espectral del verdor a lo largo del año (Zhao *et al.*, 2016).

En cuanto al proceso de selección de variables, este análisis propone una manera exhaustiva de identificar fuentes de autocorrelación espacial, reduciendo así los tiempos de cómputo de la simulación y favoreciendo directamente el proceso de validación que es realizado de manera manual e iterativa por el(la) usuario. También es relevante mencionar que, durante el proceso de validación, el valor más alto de *Fuzzy Kappa Simulation* (FKS) obtenido fue de 0,197 lo cual se consideró adecuado a pesar de que la literatura especializada recomienda un valor mínimo de 0,2 (van Vilet *et al.*, 2011; 2013), ya que en esta aplicación algunas coberturas con mayor superficie son complejas de simular (matorrales y pastizales).

Otro aspecto relevante dentro de la modelación es la pertinencia espacial de los elementos claves propuestos por cada escenario. La creación e implementación de las variables predictoras forzantes resultaron ser un mecanismo útil para representar espacialmente algunas de las ideas fuerza propuestas por los Escenarios Discursivo y Prospectivo. En el caso del Escenario Discursivo, la variable forzante representó una prohibición de cambio forestal cercana a cursos de aguas para poner a prueba la hipótesis de que, al instalarse las plantaciones forestales en esas zonas, la disponibilidad de agua disminuía. Sobre este último aspecto no es posible descartar o corroborar esta hipótesis, debido a que, de existir un mecanismo de retroalimentación negativa entre la cobertura forestal y la disponibilidad de agua, este habría quedado en evidencia al revisar el Escenario Prescriptivo. No obstante, es un análisis que requiere de una revisión hidrológica más exhaustiva.

Formas epistémicas

Revelar las formas epistemológicas es otra manera de visualizar las tensiones en el territorio y las divergencias entre la manera práctica y la discursiva. Asimismo, se considera que el pluralismo epistémico es trascendental para la elaboración de políticas públicas (Mukhtarov and Gerlak, 2015).

En este caso de estudio ocurre que mientras la forma discursiva centra la discusión en aspectos éticos de la gobernanza del agua, factores valóricos y relaciones de poder, la manera epistémica práctica toma un rol de colaboración constructivista entre las partes afectadas. Mientras que, en paralelo, adquiere nuevos conocimientos que son frutos de ese intercambio (Mukhtarov and Gerlak, 2015). Esta última idea está sustentada en la premisa de que el conocimiento se origina a partir de la práctica (Cook and Wagenaar, 2012).

Para poder avanzar hacia un pluralismo epistémico, los desarrolladores de políticas públicas deben afrontar el desafío que conlleva transmitir información convincente que avale sus ideas y proyectos, ya que el enfoque aplicado actualmente concentra un discurso enfocado en argumentos científicos y la experiencia profesional que están alejados epistémicamente de la forma discursiva, formándose así barreras en torno a la gobernanza del agua (Dobner and Frede, 2016; Shunglu *et al.*, 2022). La narrativa discursiva da sentido e importancia a los eventos, otros actores e ideas, desde argumentos valóricos y normativos, los cuales a su vez pueden servir de vínculo para encontrar puntos de convergencia con otras formas epistémicas (Mukhtarov and Gerlak, 2015). Los habitantes del mundo rural son un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente, pues ellos poseen un relato que les evoca recuerdos y emociones cuando describen el paisaje y los sistemas de producción del pasado. Aquella nostalgia es una voz y visión que no posee límites espaciales dentro del mundo rural, pero que es clave en la comprensión de las dinámicas sociales (Manushevich *et al.*, 2020).

En términos de cómo se construyen las visiones futuras, la forma epistémica discursiva se construye en base de elementos de un pasado conocido previo a la megasecuía. Mientras que en la forma práctica elabora su visión futura desde una meta concreta y específica que es el bienestar económico de la región, en donde la potenciación del rubro agroindustrial es la base para ello, finalmente, la manera prescriptiva propone un análisis más profundo del futuro previo a proyectar un escenario probable o deseado, esto debido a que están al tanto de las incertidumbres e incertezas asociadas a la predicción del futuro gracias a su formación científica. A pesar de ello, los participantes categorizados bajo esta forma epistémica lograron un consenso basado en la hipótesis de que debe evaluarse una trayectoria que favorezca la disponibilidad hídrica de los ecosistemas y para el uso humano, y que además de garantías para avanzar hacia un estado de Seguridad Hídrica de la cuenca.

Un hallazgo relevante en esta materia aparece al contrastar el escenario discursivo y el subgrupo de funcionarios del gobierno local clasificados como forma epistémica práctica, debido a que existe convergencia de ideas con respecto a cómo debiese desarrollarse la matriz productiva en el sitio de estudio. La causa principal de esta convergencia de ideas es que durante el último periodo de elecciones se consagraron integrantes que pertenecieron a agrupaciones ambientalistas locales y que, ya previamente habían desarrollado ampliamente

su diagnóstico y propuestas para afrontar la escasez de agua. Esta doble afiliación parece ser la explicación más plausible para la convergencia de ideas. Descubrimientos como el anterior, refuerzan la idea de que los elementos contextuales de cada caso de estudio tienen una alta preponderancia en la comprensión holística de los conflictos ligados al agua.

Existen otros estudios que han planteado exitosamente el mismo enfoque mixto de conectar modelos de LULCC con simulaciones hidrológicas en SWAT (Zhang *et al.* 2013; Zhou *et al.* 2013; Galleguillos *et al.*, 2021; Gimeno *et al.*, 2022). No obstante, este trabajo de investigación propone un enfoque basado en las ideas de quienes habitan el territorio y en donde son puestas a prueba las ideas que los propios actores manifiestan para solucionar el conflicto del agua en su cuenca. Bajo esta aproximación, las fuentes de conocimiento experto y experimentado definidas por Friedmann (1992) pueden encontrar convergencias y divergencias a través de un diálogo abierto y formativo.

Si bien se reconoce que el poder que posean y que puedan ejercer los actores es un factor relevante y determinante dentro del análisis del conflicto, el enfoque ejecutado en este estudio no lo toma en consideración. En cambio, se presta especial énfasis en la versatilidad de fuentes de conocimiento que se encuentran para afrontar los efectos de la megasequía, identificando no solo la presencia o ausencia de puntos comunes, sino que también se exponen razones plausibles por las cuales se producen convergencias o divergencias, bajo una aproximación metodológica replicable.

Simulación hidrológica

Tal como mencionan Sahin y Hall (1996), no es posible evitar la relación entre el cambio de uso del suelo cuando se tratan materias de hidrología, a causa de que los cambios que se puedan producir perturban directamente al ciclo del agua. En este aspecto, los resultados obtenidos por la prueba estadística logran identificar la presencia de diferencias significativas entre los caudales estivales simulados obtenidos del Escenario Base con los caudales simulados del Escenario Práctico y Prescriptivo para el periodo de megasequía. Las razones más probables, dicen relación con que el Escenario Práctico es el único que propone un incremento significativo de la superficie forestal y de la agricultura de riego, dos actividades productivas que ejercen una fuerte presión sobre la disponibilidad de agua. Con respecto al efecto de las plantaciones forestales sobre el ciclo del agua, se conoce que el incremento de esta cobertura repercute negativamente sobre las dinámicas del ciclo hidrológico (Martínez-Retureta *et al.*, 2020; Lara *et al.*, 2021).

El otro caso de diferencia estadísticamente significativa en los caudales estivales se produce al contrastar el Escenario Base con el Escenario Prescriptivo. Dicha disminución en el balance hídrico contradice la hipótesis propuesta por este escenario que volver a un estado prístino de la vegetación significaría incrementar la disponibilidad de agua en la cuenca. Aquella lógica es justificada por estudios que han demostrado que en Chile las plantaciones forestales de *Pinus radiata* evapotranspiran entre 545 a 654 mm al año y las de *Eucalyptus sp.* 731mm (Huber *et al.*, 2008). Mientras que, en una cuenca similar Gimeno *et al.*, (2022)

obtuvieron que el bosque nativo de hoja decidua posee una evapotranspiración media de 534 mm. En este estudio la estimación para la evapotranspiración de la cobertura de plantación forestal fue de 496 mm y de 501 mm para el bosque nativo. Por lo tanto, en términos de consumo de agua, ambos valores podrían estar siendo subestimados en este estudio, lo cual alteraría el orden de magnitud de las diferencias obtenidas para cada escenario, especialmente en el práctico y en el prescriptivo.

De manera análoga a lo anterior, la revisión de los valores y tendencias de ETr para las coberturas de agricultura de secano y de riego no resultan congruentes, ya que en este estudio ambas demandas de agua serían similares a lo largo del tiempo. Al respecto, datos de campo dentro de la misma región muestran que un viñedo regado por goteo posee un consumo total estimado de 580 mm (CITRA, 2017), lo cual difiere de los 166 mm utilizados en este estudio, eso sin considerar la eficiencia del sistema de riego lo que podría aumentar ese consumo en al menos un 20% lo que equivaldría a casi 700 mm (Pizarro *et al.*, 2022; Beyá-Marshall y Galleguillos, 2020). La modificación de este valor significaría que la demanda de agua en el Escenario Práctico disminuiría (caso analizado en el Apéndice 10) y que, potencialmente; se vería incrementada la provisión de agua en los Escenarios Discursivo y Prescriptivo (Apéndices 11 y 12). Por lo tanto, lo lógico sería considerar este consumo de agua simulado para los cultivos de riego como un artefacto dentro de las simulaciones, lo cual es un resultado esperable al tratarse de una primera implementación del modelo hidrológico.

En adición a lo anterior, se debe considerar en este análisis una limitante que posee el modelo SWAT+, y es que este no es capaz de incorporar los efectos de la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo por efectos de erosión cuando ocurren cambios de coberturas. Sobre esta materia, Aburto *et al.*, (2021) demuestran que la pérdida de suelo promedio en coberturas forestales puede llegar a ser 4 veces mayor que la del bosque nativo. Por ende, al no considerarse el efecto acumulativo en el tiempo de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo dentro del modelo hidrológico en sitios con predominancia forestal, es que deben revisarse con mesura los resultados obtenidos para este escenario.

Con respecto a las predicciones planteadas al comienzo de este estudio, ambas no pudieron ser corroboradas debidamente a causa de los artefactos anteriormente mencionados. Sin embargo, con la información obtenida en este estudio se desprende que incrementar significativamente la superficie de bosque nativo mediante planes de reforestación masivos no parece ser el camino adecuado para brindar Seguridad Hídrica al corto y mediano plazo, ya que el aumento de la superficie boscosa significa también un mayor consumo de agua. Por consiguiente, parece ser una opción viable para este caso de estudio trabajar en planes de restauración del matorral y con especies de bajo requerimiento hídrico para la agricultura (Galleguillos *et al.*, 2021).

Si bien en este estudio se han identificado pequeñas diferencias cuantitativas entre los caudales estivales, el foco de la discusión cambia rotundamente cuando se consideran unidades volumétricas. Por ejemplo, en el caso del Escenario Discursivo, la diferencia promedio anual de 1,2 m³/s con respecto al Escenario Base, significa que se podría completar la capacidad del Embalse Tutuvén 1,7 veces. Asimismo, el análisis es extensible a no solo el número de camiones aljibes, sino también al costo económico que conlleva gestionar la

entrega de agua potable a través de camiones aljibes (Gimeno *et al.*, 2022) a 121 familias dentro de la cuenca.

CONCLUSIONES

En términos generales, la modelación de usos de la tierra obtuvo resultados adecuados a pesar de las múltiples dificultades que conlleva simular coberturas que presentan un comportamiento variable a lo largo del año, como son los matorrales y los pastizales. Tanto las fuentes de error como las de acierto fueron detectadas suficientemente gracias a la aplicación en paralelo de dos métodos de validación del modelo espacial.

En función del análisis conjunto de los escenarios espaciales e hidrológicos, existe evidencia suficiente para aceptar la hipótesis planteada al comienzo de esta tesis, ya que en dos de los tres escenarios planteados fueron detectadas diferencias estadísticamente significativas en los caudales estivales. Si bien las magnitudes de los resultados hidrológicos son cuestionables debido a la subestimación de los consumos de agua para las coberturas: forestal, bosque nativo y agricultura de riego, de todas maneras, se identificaron las tendencias en términos del consumo de agua para lograr una evaluación más exhaustiva del efecto en la disponibilidad hídrica ante los escenarios simulados.

A pesar de lo anterior, en esta tesis se logró aplicar satisfactoriamente una aproximación metodológica novedosa y replicable fundada en la aplicación conjunta de métodos cuantitativos y cualitativos, la cual podría ser un insumo para la elaboración de planes y estrategias dedicados a fortalecer la Seguridad Hídrica. La incorporación del enfoque cualitativo en la elaboración de los escenarios de cambio de uso de la tierra permitió identificar y describir las principales ideas, hipótesis y propuestas desarrolladas por quienes poseen un rol activo dentro de la gobernanza hídrica de la cuenca, categorizándolas en función de su forma epistémica de comprender la problemática hídrica. En paralelo, las técnicas cuantitativas fueron claves para poner a prueba hidrológicamente las ideas fuerza contenidas en cada escenario.

La identificación de convergencias y divergencias entre los escenarios entregan información que va más allá de la provisión de agua para la cuenca. Pues, logran desentramar diferentes formas de comprender un mismo territorio. Trabajar bajo la premisa de existen estas formas epistémicas ayuda a elevar el debate a aspectos más amplios, y también son útiles como argumentos para que la generación de políticas públicas que incluyan la versatilidad de formas de conocimientos. Incorporar estos conocimientos puede dar legitimidad a la institucionalidad y gestión del agua, para así avanzar concretamente en mecanismos que provean Seguridad Hídrica en cuencas hidrológicamente vulnerables afectadas por la megasequía.

Si bien este estudio no posee una respuesta final sobre cómo se debiera fortalecer la seguridad hídrica en una cuenca, se busca representar un estado de transición que aleja la antigua visión tecnocrática y científica que privilegiaba la toma de decisiones basada en criterios expertos, hacía una visión más dialógica, descentralizada y pluralista epistemológicamente.

LITERATURA CITADA

- Aburto, F., E. Cartes., O. Mardones., and R. Rubilar. 2021. Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-Central Chile. *Land Degrad Dev* 1-14.
- Bauer, C. 1998. Slippery Property Rights: Multiple Water Uses and the Neoliberal Model in Chile, 1981-1995. *Natural Resources Journal* 34(4).
- Berbés-Blázquez, M. 2012. A Participatory Assessment of Ecosystem Services and Human Wellbeing in Rural Costa Rica Using Photo-Voice. *Environmental Management* 49(4):862-75.
- Berkes, F., and C. Folke. 2000. Rediscovery of Traditional Ecological Knowledge as Adaptive Management. *Ecological Applications* 10(5): 1251-1262.
- Beyá-Marshall, V., y M. Galleguillos. 2020. Optimización del riego en paltos y cítricos. Editorial Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). S.F. Mapoteca. Mapas Vectoriales “División comunal: polígonos de las comunas de Chile”. Disponible en <https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/10396/2/Comunas.zip>. (Consultado en junio de 2019).
- Bieger, K., G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., and Srinivasan, R. 2017. Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1):115–130.
- Boelens, R., J. Hoogesterger, E. Swyngedouw, J. Vos., and P. Wester. 2016. Hydro Social territories: a political ecology perspective. *Water International* 41(1):1-14.
- Boisier, J., R. Rondanelli, S. Garreaud., and F. Muñoz. 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile.
- Boisier, J.P, and P. Aceituno. 2006. Changes in surface and upper-air temperature along the arid coast of northern Chile. *Anales del XIV Congresso Brasileiro de Meteorología*.
- Britz, W., P. Verburg., and A. Leip. 2011. Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 142(1-2):40-50.
- Brown, D., P. Verburg., R. Pontius., and M. Lange. 2013. Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Environmental Sustainability* 5(5):452-457.

Budds, J. 2004. Power, Nature and neoliberalism: the political ecology of water in Chile. *Singapore Journal of Tropical Geography* 25(3):322-342.

Budds, J. 2013. Water, Power, and the Production of Neoliberalism in Chile, 1973–2005. *Environment and Planning D: Society and Space* 31(2):301–318.

Budds, J. 2018. Securing the market: Water security and the internal contradictions of Chile's Water Code. *Geoforum*.

Budds, J. 2020. Gobernanza del agua y desarrollo bajo el mercado: las relaciones sociales de control del agua en el marco del Código de Aguas de Chile. *Investigaciones Geográficas* 59: 16-27.

Cardwell, H., R. Cole, L. Cartwright., and L. Martin. 2006. Integrated Water Resources Management: Definitions and Conceptual Musings. *Journal of Contemporary Water Research & Education* 135(1):8-18.

Carlsson, J., L. Eriksson, K. Öhman., and E. Nordström. 2015. Combining Scientific and stakeholder knowledge in future scenario development – A forest landscape case study in northern Sweden. *Forest Policy and Economics* 61:122-134.

Castella, J., and P. Verburg. 2007. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. *Ecological Modeling* 202:420-420.

Cauquenesnet. 2021. Corte Suprema ordena a Viña Santa Carolina el cese de la intervención del río San Juan en Coronel de Maule. Disponible en https://cauquenesnet.cl/2021/09/15/cauquenes-corte-suprema-ordena-vina-santa-carolina-el-cese-de-la-intervencion-del-rio-san-juan-en-coronel-de-maule/?fbclid=IwAR2UqwKpTjsqZbQJhvST_ObkDHkKHpbqJpiUzmOIW8MOM--T5BSr__2aCgI

Cauquenino. 2021. CiperChile detalla como la Viña Undurraga sacaba agua del Río Cauquenes situación denunciada por CODAC de Cauquenes. Disponible en https://edinetwork.net/w8/z/064/index.asp?seccion1=contenido&id_web=427&sec=7&id_articulo=1854&key=&ref=&i=

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). 2015. Informe a la Nación: La Megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Santiago, Chile.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). 2018. Guía de Referencia para la Plataforma de Visualización de Simulaciones Climáticas. Santiago, Chile.

Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA). 2017. Sistema Integral para la Gestión Hídrica en la Agricultura usando información meteorológica e imágenes satelitales. Disponible en: https://chile.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk4826/files/inline-files/file_1506448392.pdf. (Consultado en mayo de 2022).

- Chen, Y., J. Li., H. Wang., J. Qin., and L. Dong. 2017. Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(2):735–749.
- Ciper-Chile, 2020. El avance de la desertificación: II: los millonarios subsidios de riego a agroexportadoras. Publicado el 07-12-2020 por Maximilano Barzán. Disponible en <https://www.ciperchile.cl/2020/12/07/el-avance-de-la-desertificacion-ii-los-millonarios-subsidios-de-riego-a-agroexportadoras/>
- CIREN. 2011. Determinación de la erosión actual y potencial del territorio de Chile.
- Comisión Nacional de Riego (CNR). 2019. Capa de información Geográfica que representa los Canales de Riego.
- Conca, K. 2006. *Governing Water: Contentious Transnational Politics and Global Institution Building*. Cambridge and London: The MIT Press.
- Cook, B., and K. Bakker. 2012. Water Security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change* 22(1):94-102.
- Cook, N., and H. Wagenaar. 2012. Navigating the Eternally Unfolding Present: Toward an Epistemology of Practice. *The American Review of Public Administration* 42(1):3-38.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2019. Resumen Nacional Ocurrencia (Número) y Daño (Superficie Afectada) por Incendios Forestales 1964-2019. Santiago, Chile. Disponible en https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1567012254TABLA1_TEMPORADA2019_01_OK.xls (Consultado en junio de 2020).
- DeFries, R., and K. N. Eshelman. 2004. Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future. *Hydrological Processes* 18:2183-2186.
- Delmotte, S., V. Courdec, J-C. Mouret, S. Lopez-Ridaura, J-M. Barbier., and L. Hossard. From stakeholders' narratives to modelling plausible future agricultural systems. *Integrated Assessment of scenarios for Camargue, Southern France. European Journal of Agronomy* 82:292-307.
- Dobner, P., and HG. Frede. 2016. *Water Governance: A Systemic Approach*. Water Resources Development and Management, Cham.
- Farr, T., and M. Kobric. 2000. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Eos Trans* 81:583-583.
- Folke, C. 2004. Traditional knowledge in Socio-Ecological Systems. *Ecology and Society* 9(3).
- Friedmann, J. 1992. Planificación para el Siglo XXI: El Desafío del Posmodernismo. *EURE* 28(55):82-87.

Fuster, R., C. Escobar., K. Silva., and K. Astorga. 2017. Informe Final: Estudio de Seguridad Hídrica en Chile en un contexto de Cambio Climático para elaboración del Plan de Adaptación de los recursos hídricos al Cambio Climático. Laboratorio de Análisis Territorial. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.

Galleguillos, M., F. Gimeno., C. Puelma., M. Zambrano-Bigiarini., A. Lara., and M. Rojas. 2021. Disentangling the Effect of future land use strategies and Climate change on streamflow in a Mediterranean catchment dominated by tree plantations. *Journal of Hydrology*.

Garcia, F., Folton, N., and Oudin, L. 2017. Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low-flow index simulations? *Hidrological Sciences Journal* 62(7):1149-1166.

Gareth, J., D. Witten., T. Hastie., and R. Tibshirani. 2017. *An Introduction to Statistical Learning*. 8th edition. Springer Science. New York, USA.

Garreaud, R., C. Álvarez-Garretón., J. Barichivich., J.P. Boisier., D. Christie., M. Galleguillos, C. LeQuesne, J. McPhee., and M. Zambrano-Bigiarini. 2017. The 2010-2015 Megadrought in Central Chile: Impacts on Regional Hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth Systems Sciences* 21:6307-6327.

Gimeno, F. 2019. Evaluación de la Respuesta Hidrológica bajo distintos escenarios de uso de suelo en la cuenca del Río Lumaco, Región de la Araucanía, Chile. 104 p. Tesis Magister. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Santiago, Chile.

Gimeno, F., M. Galleguillos., D. Manushevich., and M. Zambrano-Bigiarini. 2022. A coupled modeling approach to assess the Effect of forest policies in water provision: A biophysical evaluation of a drought-prone rural catchment in south-central Chile. *Science of the Total Environment* 830

González, M., A. Lara, R. Urrutia., and J. Bosnich. 2011. Climatic change and its potential impact on forest fire occurrence in south-central Chile (33° - 42° S). *Bosque (Valdivia)* 32(3): 215-219.

González, M., S. Gómez-González. A. Lara, R. Garreaud., and I. Díaz-Hormazábal. 2018. The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere* 9(8).

GORE Maule. 2015. Plan Secano Maule Sur: 2016 – 2018. Programa de Gestión Territorial para Zonas Rezagadas.

Government Office for Science. 2017. *The Futures Toolkit: Tools for Futures Thinking and Foresight Across UK Government*, Edition 1.0. Disponible en: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/674209/futures-toolkit-edition-1.pdf.

- Griewald, Y., G. Clemens., J. Kamp., E. Gladun., N. Hölzel., and H. Dressler. 2017. Developing land use scenarios for stakeholder participation in Russia. *Land Use Policy* 68: 265-274.
- Hadjigeorgalis, E., and J. Lillywhite. 2004.. impact of institutional constraints on the Limari River Valley water market. *Water Resources Research* 40(5):W055011–W0550111.
- Hagen, A. 2003. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*. *IJGIS* 17(3):235-249.
- Henríquez-Dole, L., Usón, T., Vicuña, S., Henríquez, C., Gironás, J., and Meza, F. 2018. Integrating strategic land use planning in the construction of future land use scenarios and its performance: The Maipo River Basin, Chile. *Land Use Policy* 78:353-366.
- Hernández-Sampieri, R., C. Fernández., and P. Lucio. 2003. *Metodología de la investigación*. Tercera Edición. McGraw-Hill Interamericana. México.
- Hirayama, H., R. Sharma., M. Tomita., and K. Hará. 2018. Evaluating multiple classifier system for the reduction of salt-and-pepper noise in the classification of very high resolution satellite images. *International Journal of Remote Sensing*. 40(3):1-16.
- Horan, R., E. Fenichel., K. Drury., and D. Lodge. 2010. Managing Ecological thresholds in coupled environmental-human systems. *PNAS* 108(18):7333-7338.
- Huber, A., A. Iroume., and J. Bathurst. 2008. Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological processes* 22:142-148.
- Instituto Forestal (INFOR). 2018. Mapa de la Industrial Forestal Primaria.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2017. Índices de Seguridad Hídrica (ISH) Clave: HC1711.1 – Informe Final. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1831/HC1711.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (consultado en enero 2021).
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2017. Censo de Población y vivienda 2017. Santiago, Chile.
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277.
- Kolkman, M., A. Veen, and P. Geurts. 2007. Controversies in water management: Frames and mental models. *Environmental Impact Assessment Review* 27(7):685-706.
- Lacoste, P., Castro, A., Rendón, B., and P. Pszczólkowski. 2016. Asoleado de Cauquenes y Concepción: apogeo y decadencia de un vino chileno con Denominación de Origen. *Idesia* 34(1):85-99.

- Lara, A., J. Jones., C. Little., and N. Vergara. 2021. Streamflow response to native forest restoration in former Eucalyptus plantations in south central Chile. *Hydrological Processes* 38(8).
- Lesschen, J., K. Kok., P. Verburg., and L. Cammeraat. 2007. Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain. *CATENA* 71(1):110-121
- Lin, B., X. Chen., H. Yao., Y. Chen., M. Liu, L. Gao., and A. James. 2015. Analyses of land use change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecological Indicators* 58:55–63.
- Luebert, F., and P. Plischoff. 2018. *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Segunda Edición. Editorial Universitaria, Santiago.
- Manushevich, D., and C. Beier. 2016. Simulating land use changes under alternative policy scenarios for conservation of native forest in south-central Chile. *Land Use Policy* 51:350-362.
- Manushevich, D., M. Gurr., and C. Ramirez-Pascualli. 2020. Nostalgia for la montaña: The production of landscape at the frontier of Chilean commercial forestry. *Journal of Rural Studies* 80.
- Manushevich, D., P. Sarricolea., and M. Galleguillos. 2019. Integrating socio-ecological dynamics into land use policy outcomes: A spatial scenario approach for native forest conservation in south-central Chile. *Land Use Policy* 84:31-42.
- Martínez-Retureta, A., M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., and J. Sánchez-Pérez. 2020. Effect of Land Use/Cover Change on the Hydrological Response of a Southern Center Basin of Chile. *Water (Basel)*, 12(1):302.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). 2019. Red Vial Nacional actualizada al año 2015.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). 2021. Información pluviométrica, fluviométricos, estado de embalses y aguas subterráneas. Disponible en: https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin_julio_2021.pdf
- Mould, B., W. Buytaert., and A. Mijic. 2015. An open and extensible framework for spatially explicit land use change modelling: the lulcc R package. *Geoscientific Model Development* 8(10):3215-3229.
- Mukhtarov, F., and A. Gerlak. 2013. Epistemic forms of integrated water Resources management: towards knowledge versatility. *Policy Sciences* 47:101-120.
- Nassauer, J. and R. Corry. 2002. Using normative scenarios in landscape ecology. *Kluwer Academic Publishers* 19:354.

Neitsch, S., J. Arnold., J. Kiniry., and J. Williams. 2009. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation. Temple, Texas: Agricultural Research Service.

Nemec, K., J. Chan, C. Hoffman, T. Spanbauer, J. Hamm, C. Allen, T. Hefley, D. Pan., and P. Shrestha. 2014. Assessing Resilience in Stressed Watersheds. *Ecology and Society* 19(1): 1-13.

Nieto-Romero, M., A. Milcu., J. Leventon., F. Mikulack., and J. Fischer. 2016. The role of scenarios in fostering collective action for sustainable development: Lesson from central Romania. *Land Use Policy* 50:156-168.

Nomade Consultores y Ámbito Consultores. 2019. Plan Regulador Intercomunal Cauquenes: Etapa 1.2. Levantamiento de Información, análisis territorial e inicio de la EAE (Resumen Ejecutivo). Disponible en <https://pricauquenes.files.wordpress.com/2019/07/resumen-ejecutivo-etapa-1.2.pdf> (Consultado en junio 2019).

Notter, B., H. Hurni., U. Wiesmann., and K. Abbaspour. 2013. Modelling water provision as an ecosystem service in a large East African river Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(1):69-86.

Nugroho, P., D. Marsono., P. Sudira., and H. Suryatmojo. 2013. Impact of land-use changes on water balance. *Procedia Environmental Sciences* 17:256-262.

Olsson, P., T. Hahn., and C. Folke. 2004. Social-Ecological Transformations for Ecosystem Management: The Development of adaptative Co-management of a Wetland Landscape in Southern Sweden. *Ecology and Society* 9(4).

Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2015. La Asamblea General Adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/> (Consultado en abril de 2020).

Öztürk, M., N. Coptý., and A. Saysel. 2013. Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed. *Journal of Hydrology* 497:97–109.

Paterson, T., R. Heim, R. Hirsch, D. Kaiser, H. Brooks, N. Diffenbaugh, R. Dole, J. Giovannettone, K. Guirguis, T. Karl, R. Katz, K. Kunkel, D. Lettenmaier, G. McCabe, C. Paciorek, K. Ryberg, S. Schubert, V. Silva, C. Brooke, A. Vecchia, G. Villarini, R. Vose, J. Walsh, M. Wehner, D. Wolock, K. Wolter, C. Woodhouse, and D. Wuebbles. Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods, and droughts in the United States: state of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94(6):821-834.

Peña, H. 2016. Desafíos a la Seguridad Hídrica en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile.

Pizarro, E., M. Galleguillos., P. Barría., and R. Callejas. 2022. Irrigation management or Climate change? Which is more important to cope with water shortage in the production of table grape in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management*. 263.

- Polasky, S., S Carpenter., C. Folke, and B. Keeler. 2012. Decision-making under great Uncertainty: Environmental management in an era of global change. *Trends in Ecology and Evolution* 26(8):4-7.
- Pontius, R., S. Peethambaram., and J. Castella. 2011. Comparison of Three Maps at Multiple Resolutions: A Case Study of Land Change Simulation in Cho Don District, Vietnam. *Annals of the Association of American Geographers* 101:45-62
- Pool, S., Vis, M., & Seibert, J. (2018). Evaluating model performance: towards a non-parametric variant of the Kling-Gupta efficiency. 63(13).
- Rindfuss, R., S. Walsh, B. L. Turner II, J. Fox., and V. Mishra. 2004. Developing a science of land change: Challenges and methodological issues. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101(39):13976-13981.
- Saldaña, J. *The Coding Manual for Qualitative Researchers*. Second Edition. SAGE. Arizona, EEUU.
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps. Science* 13(2):66–73.
- Shynglu, R., S. Köpke., L. Kanoi., T. Nissanka., C. Withanachchi., D. Gamage., H. Dissanayke., A. Kibaroglu., O. Ünver., and S. Withanachchi. 2022. Barriers in Participative Water Governance: A Critical Analysis of Community Development Approaches. *Water* 14:762.
- Spradley, J. 1979. *The ethnographic interview*. Holt, Rinehart and Wiston.
- Stringer, L., A. Dougill, E. Fraser, K. Hubacek, C. Prell, and M. Reed. 2006. Unpacking “participation” in the Adaptative Management of Social-Ecological Systems: A Critical Review. *Ecology and Society* 11(2).
- Taylor, S., and R. Bogdan. 2008. *Introducción a los métodos cualitativos de investigación: la búsqueda de significado*. Barcelona, España. Paidós.
- Van Vilet, J., A. Hagen-Zanker., J. Hurkens., and H. van Delden. 2013. A fuzzy set approach to assess the predictive accuracy of land use simulations. *Ecol. Model* 261-262:32-42.
- Van Vilet, J., A.K. Bregt., and A. Hagen-Zanker. 2011. Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecol. Model* 222:1367-1375.
- Veldkamp, A., and L. Fresco. 1996. CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological modeling* 85:253-270.
- Verburg, P., and K. Overmars. 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology* 24(9):1167-1181.

Vernables, W., and B. Ripley. 2002. *Modern Applied Statistics with S*, Fourth Edition. Springer. New York.

World Health Organization. 2003 *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. Reporte Técnico. Geneva, Suiza.

Zambrano-Bigiarini, M., and R. Rojas. 2013. A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration. *Environmental Modelling and Software* 43:5-25.

Zhang, P., Y. Liu., Y. Pan., and Z. Yu. 2013. Land use patten optimization based on CLUE-s and SWAT model for agricultural non-point source pollution control. *Mathematical and Computer Modelling* 45(3-4):588-595.

Zhao, Y., D. Feng., L. Yu., X. Wang., Y. Chen., Y. Bai., J. Hernández., M. Galleguillos., C. Estrades., G. Biging., J. Radke., and P. Gong. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment* 183: 170-185.

Zhou, F., Y. Xu., Y. Chen., C. Xu., Y. Gao., and J. Du. 2013. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporales scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology* 485(2):113-125.

ANEXOS Y APÉNDICES

Anexo 1. Características de las formas epistémicas para comprender la Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

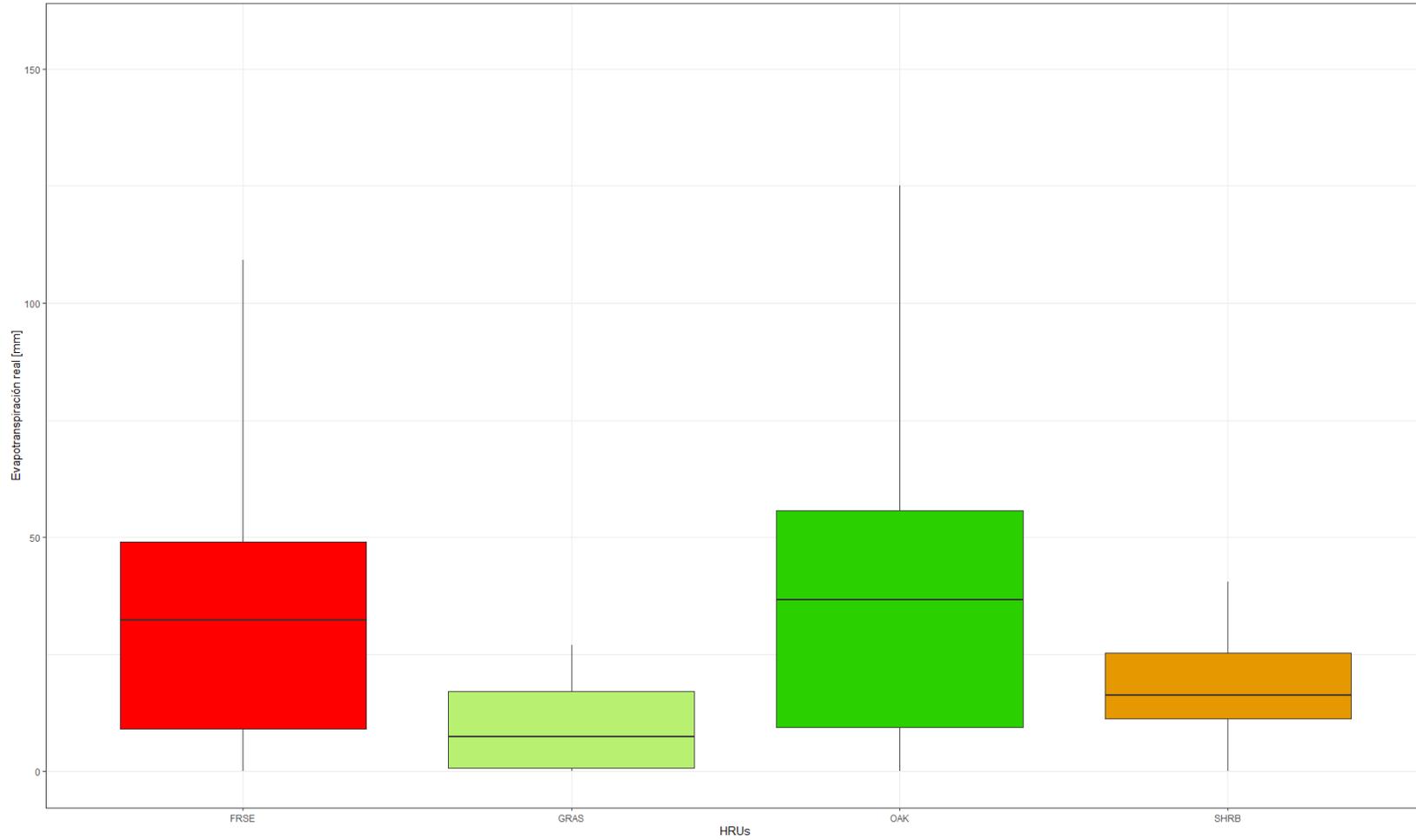
	Prescriptiva	Discursiva	Práctica
Esencia	Definiciones claras del problema y la solución	del Valores y ética	Relevancia contextual
	Cuestionamientos del accionar	del Simbolismo en la política	Aprendizaje basado en la experimentación
	Ejemplos de "buenas prácticas"	Dinámicas de poder	
Forma de expresión	Planificación en base a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos	Reportes del agua emitidos por las Naciones Unidas	Planificación participativa basada en modelos
	Legislación y manuales para asegurar la participación	Declaraciones, pautas	Informes de factibilidad
Lógica	Lógica de instrumentalización	la Lógica de la apropiación	Lógica de la concretización
Ejemplo	Academia	Agricultores y ONGs	Instituciones gubernamentales

Fuente: Adaptado de Mukhtarov y Gerlak (2013)

Anexo 2. Parámetros vegetacionales SWAT+

Descripción	Plantaciones	Bosque	Suelo		Cultivo		
	Forestales	Nativo	Desnudo	Praderas	Cultivo	Irrigado	Matorrales
plnt_typ	perennial	perennial	perennial	perennial	perennial	perennial	perennial
gro_trig	temp_gro	temp_gro	temp_gro	temp_gro	temp_gro	temp_gro	temp_gro
nfix_co	0	0	0	0	0	0	0
days_mat	253	274	0	204	0	0	284,5
bm_e	15	15	34	34	34,25	34,25	34
harv_idx	0,76	0,76	0,9	0,9	0,68	0,68	0,9
lai_pot	2,39	2,95	0,5	1,14	2,5	3,5	1,57
frac_hu1	0,08	0,16058	0,05	0,11	0,1	0,1	0,04
lai_max1	0,89	0,42385	0,1	0,54	0,05	0,05	0,51
frac_hu2	0,42	0,35401	0,25	0,33	0,5	0,5	0,28
lai_max2	0,99	0,95254	0,7	0,7	0,95	0,95	0,98
hu_lai_decl	0,99	0,99	0,35	0,35	0,82	0,82	0,35
dlai_rate	1	1	1	1	1	1	1
can_ht_max	10	6	1	1	0,75	0,75	1
rt_dp_max	3,5	3,5	2	2	2	2	2
tmp_opt	30	30	25	25	27,5	27,5	25
tmp_base	0	10	12	12	11,5	11,5	12
frac_n_yld	0,0015	0,0015	0,016	0,016	0,0217	0,0217	0,016
frac_p_yld	0,0003	0,0003	0,0022	0,0022	0,0033	0,0033	0,0022
frac_n_em	0,006	0,006	0,02	0,02	0,052	0,052	0,02
frac_n_50	0,002	0,002	0,012	0,012	0,0198	0,0198	0,012
frac_n_mat	0,0015	0,0015	0,005	0,005	0,0131	0,0131	0,005
frac_p_em	0,0007	0,0007	0,0014	0,0014	0,0072	0,0072	0,0014
frac_p_50	0,0004	0,0004	0,001	0,001	0,0027	0,0027	0,001
frac_p_mat	0,0003	0,0003	0,0007	0,0007	0,0019	0,0019	0,0007
harv_idx_ws	0,6	0,01	0,9	0,9	0,575	0,575	0,9
usle_c_min	0,001	0,001	0,003	0,003	0,102	0,102	0,003
stcon_max	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
vpd	4	4	4	4	4	4	4
frac_stcon	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ru_vpd	8	8	10	10	9,25	9,25	10
co2_hi	660	660	660	660	660	660	660
bm_e_hi	16	16	39	39	36	36	39
plnt_decomp	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
lai_min	2,01	0,89	0,17639	0,31	0,17639	0,15	0,49
bm_tree_acc	0,3	0,3	39	49	58	58	39
yrs_mat	30	50	61	69	73	73	61
bm_tree_max	100	100	74	79	81	81	74
ext_co	0,65	0,65	80	84	85,5	85,5	80
leaf_tov_mn	12	12	12	12	12	12	12
leaf_tov_mx	3	3	3	3	3	3	3
bm_dieoff	0,1	0,1	0	0	1	1	0
rt_st_beg	0,4	0	0	0	0	0	0
rt_st_end	0,2	0	0	0	0	0	0
plnt_pop1	100	0	0	0	0	0	0
frac_lai1	0,05	0	0	0	0	0	0
plnt_pop2	1000	0	0	0	0	0	0
frac_lai2	0,95	0	0	0	0	0	0
frac_sw_gro	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
wnd_live	0	0	0	0	0	0	0
wnd_dead	0	0	0	0	0	0	0
wnd_flat	0	0	0	0	0	0	0

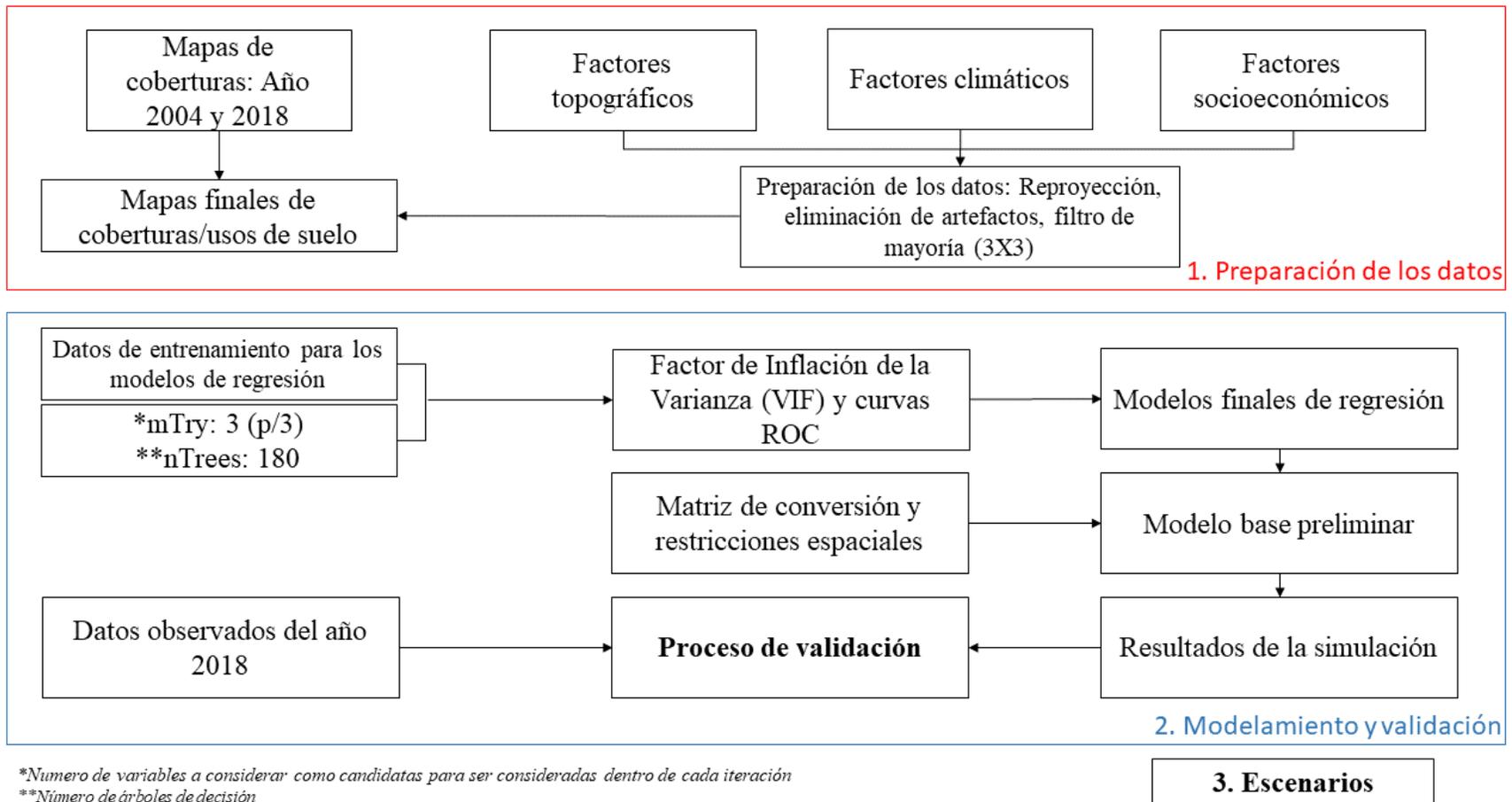
Fuente: Equipo de hidrología Proyecto NSFC 190019

Anexo 3. Variación de la Evapotranspiración real [mm] para las HRU empleadas en SWAT+.

En el eje de las abscisas: FRSE = Plantaciones forestales, GRAS = Praderas, OAK = Bosque Nativo, SHRB = Matorral.

Fuente: Equipo de hidrología Proyecto NSFC 190019

Apéndice 1. Diagrama metodológico simulación espacial.



*Número de variables a considerar como candidatas para ser consideradas dentro de cada iteración

**Número de árboles de decisión

Adaptado de Peng et al., 2020

Apéndice 2. Pauta para las entrevistas semiestructuradas

Autora: Daniela Manushevich

Para actores locales individuales

Caracterización

Aspectos individuales y personales (¿Cuál es su nombre? ¿Qué edad tiene? ¿Dónde nació?)

Vínculos (¿Con quiénes vive? ¿Tiene más familiares viviendo aquí? ¿)

¿Comparte con otros vecinos/grupos/actores? (¿Con quiénes trabaja/se relaciona? ¿Asiste a reuniones mensuales/ juntas de vecinos/taller/ iglesia grupos de intereses)

¿Participa de alguna asociación? (productores /ambientalista/ otro)

Trabajo, agua y tierra

Trayectoria de relación con la tierra y el agua (¿En qué trabaja? ¿Varía su trabajo a lo largo del año?)

Usos de la tierra, repertorio de prácticas (¿Qué hace usted con este campo? ¿Cómo lo trabaja? ¿Qué siembra/planta/cultiva? ¿Tiene animales? ¿Desde cuándo lo hace? ¿Por qué? ¿Quiénes le ayudan? etc.)

¿Tiene acceso al agua? ¿Cómo es ese acceso? ¿Tiene pozo? ¿Qué tan profundo? (¿Tiene los papeles del agua? ¿Tiene agua todo el año? Si no tiene ¿Qué hace? Tiene pozo, saca de una fuente superficial, llama al municipio)

Pasado, presente y futuro

¿Cómo era esta zona cuando ud. era niña/o? (¿Como era antes esta zona? ¿Quiénes vivían antes aquí? ¿Qué actividades o tareas eran las más importantes? ¿Cambió eso? ¿Por qué cree que cambió?)

¿Cómo eran las lluvias antes? (¿Cuánto cambiaron? ¿Por qué cambiaron?)

Y ahora ¿Cómo se siente usted al vivir aquí?

¿Cómo le gustaría que fuera este lugar el futuro? (alguna actividad del pasado, algún actor/empresa del pasado que se va / o vuelve? ¿Por qué?)

¿Qué cree que deberían hacer las autoridades para el futuro de esta zona? (Fomentar algo favorecer /sacar algo/ cuidar/ mantener algo) ¿Por qué?

¿Qué paisaje quisiera que vieran sus nietos/la juventud? (¿Qué hay en ese paisaje? ¿En qué trabaja la gente? ¿Hay más agua? ¿Por qué?)

¿Qué tendría que pasar para que ese paisaje sea una realidad? (Algo que hace/deja de hacer la comunidad, las empresas, las personas, el municipio, el gobierno regional, el estado)

Para actores locales que representan a colectivos

Caracterización

Aspectos individuales y personales (¿Cuál es su nombre? ¿Qué edad tiene? ¿Dónde nació?)

¿Con quiénes vive? ¿Tiene más familiares viviendo aquí?)

¿Comparte con otros vecinos/grupos/actores? (¿Con quiénes trabaja/se relaciona? ¿Asiste a reuniones mensuales/ juntas de vecinos/taller/ iglesia grupos de intereses)

Labores y roles colectivos (¿A qué agrupación pertenece? ¿Qué cargo ocupa? ¿Cómo llegó a ese cargo? ¿Cuál es su rol/trabajo o de qué se encarga? ¿Por qué asumió este cargo?)

Trabajo, agua y tierra

Trayectoria de relación con la tierra y el agua (¿En qué trabaja? ¿Varía su trabajo a lo largo del año?)

Usos de la tierra, repertorio de prácticas (¿Qué hace usted con este terreno? ¿Cómo lo trabaja? ¿Qué siembra/planta/cultiva? ¿Tiene animales? ¿Desde cuándo lo hace? ¿Por qué? ¿Quiénes le ayudan? etc.)

¿Tiene acceso al agua? ¿Cómo es ese acceso? ¿Cómo es ese acceso? ¿Tiene pozo? ¿Qué tan profundo? (¿Tiene los papeles del agua? ¿Tiene agua todo el año? Si no tiene ¿Qué hace? Tiene pozo, saca de una fuente superficial, llama al municipio)

Pasado, presente y futuro

¿Cómo era esta zona cuando ud era niña/o? (¿Como era antes esta zona? ¿Quiénes vivían antes aquí? ¿Qué actividades o tareas eran las más importantes? ¿Cambió eso? ¿Por qué cree que cambió?)

¿Cómo eran las lluvias/ precipitaciones antes? (¿Cuánto cambiaron? ¿Por qué cambiaron?)

Y ahora ¿Cómo se siente usted al vivir aquí?

¿Cómo le gustaría que fuera este lugar el futuro? (alguna actividad del pasado, algún /empresa del pasado que se va / o vuelve? ¿Por qué?)

¿Qué cree que deberían hacer las autoridades para el futuro de esta zona? (Fomentar algo favorecer /sacar algo/ cuidar/ mantener algo ¿Por qué?)

¿Qué experiencia ha tenido con las autoridades? (¿Qué pasó? ¿Por qué cree que es así? ¿Que tendría que cambiar?)

¿Qué rol cree que tiene el estado/privados/ comunidades en el desarrollo de la región?

¿Qué paisaje quisiera que vieran sus nietos/la juventud? (¿Qué hay en ese paisaje? ¿En qué trabaja la gente? ¿Hay más agua? ¿Por qué?)

¿Qué tendría que pasar para que ese paisaje sea una realidad? (Algo que hace/deja de hacer la comunidad, las empresas, las personas, el municipio, el gobierno regional, el estado)

Para agentes estatales y paraestatales involucrados

Caracterización

Aspectos individuales y personales (¿Qué cargo desempeña? ¿Qué formación tiene? ¿Hace cuánto tiempo trabaja acá? ¿De dónde es originario/a?)

Roles y labores (¿Cuáles son las principales tareas de su cargo? ¿Con quiénes se relaciona?

¿Cómo es un día normal de actividades laborales para usted?)

Trabajo

Opinión y percepción del propio trabajo (¿Le gusta su trabajo? ¿Por qué? ¿Cuál es la parte más gratificante del trabajo? ¿Cómo es la relación con la/s comunidad/es para la/s que trabaja? ¿Cuál es su opinión en general del trabajo con otras instituciones/en estos proyectos?)

¿Qué rol cree que tiene el estado/privados/ comunidades en el desarrollo de la región?

¿Cómo ve la situación del agua en la región? (¿Cuál es la situación? ¿Cuál es la causa? ¿Qué soluciones ve?)

Pasado, presente y futuro

¿Como era antes esta zona? (¿Qué actividades o tareas eran las más importantes? ¿Cambió eso? ¿Por qué cree que cambió?)

¿Cómo eran las precipitaciones antes? (¿Cuánto cambiaron? ¿Por qué cambiaron?)

¿Cómo es vivir acá ahora?

¿Cómo le gustaría que fuera este lugar el futuro? (alguna actividad del pasado, algún actor/empresa del pasado que se va / o vuelve? ¿Por qué?)

¿Qué cree que deberían hacer las autoridades para el futuro de esta zona? (Fomentar algo favorecer /sacar algo/ cuidar/ mantener algo) ¿Por qué?)

¿Qué paisaje quisiera que vieran sus nietos/la juventud? (¿Qué hay en ese paisaje? ¿En qué trabaja la gente? ¿Hay más agua? ¿Por qué?)

¿Qué tendría que pasar para que ese paisaje sea una realidad? (Algo que hace/deja de hacer la comunidad, las empresas, las personas, el municipio, el gobierno regional, el estado)

Apéndice 3. Diseño Metodológico para los talleres participativos.

Autores: Aarón Grau y Daniela Manushevich. Universidad de Chile

¿Cuáles son los principales objetivos de la actividad?

- 1) Acordar de manera conjunta y deliberativa una visión futura para afrontar la crisis hídrica en su cuenca para afrontar la crisis hídrica que responda de manera inclusiva a la pluralidad de opiniones.
- 2) Identificar elementos/requisitos que sean necesarios para alcanzar el cambio con miras hacia aquel futuro acordado.
- 3) Discutir sobre los pasos/estrategias/cambios/lineamientos que se requieren para alcanzar dicha visión futura.

¿Qué tipo de enfoque se pretende aplicar?

Dado que los talleres pretenden propiciar un ambiente de diálogo entre los participantes, es que el enfoque requerido por los ejecutores tendrá un rol de facilitadores para fomentar el diálogo y el intercambio de ideas. Razón por lo cual, la parte expositiva no considera utilizar más de un 20% del tiempo total del taller.

¿Cuánto tiempo toma el taller?

El tiempo estimado está comprendido entre una hora y treinta minutos a dos horas, aproximadamente.

¿Cuántos participantes pueden participar?

Es variable, por ello ante la posibilidad de que asistan más de 20 personas, se ha considerado optar por dividir a los participantes en pequeños subgrupos de máximo 6 personas.

Algunas consideraciones

Como se ha mencionado en los documentos anteriores, el equipo investigador no pretende exacerbar o propiciar una instancia que derive en una situación conflictiva entre grupos de actores. Por esta razón, el diseño del taller contempla la posibilidad de que los ejecutores del taller puedan abordar de manera general ciertos tópicos o de detallar en aspectos que son de interés para este estudio.

¿Cómo se llevará a cabo?

En el caso de ambos talleres, el procedimiento inicial será el mismo. Primero, los investigadores y ejecutores del taller darán la bienvenida y se presentarán (5 minutos). Luego, se procederá con una sesión expositiva para explicar en términos generales por qué los hemos consultado a ellos y los objetivos del proyecto de investigación (5 minutos). Después, se presentará el concepto de Seguridad Hídrica,

con especial énfasis en su importancia y el rol que desempeñan todos los actores relacionados a la gobernanza hídrica de la cuenca. Para reforzar la idea, se proyectarán datos que muestren los gradientes de precipitación y temperatura en el tiempo, haciendo hincapié en que los efectos del cambio climático no son un evento futuro, sino que están ocurriendo desde hace ya algunos años (10 minutos). Una vez concluida la fase anterior, se procederá a explicar el funcionamiento de la actividad correspondiente, que puede ser “Visionar” o “Retrospección” (5 minutos).

Taller: “¿Cómo quiero que sea [*nombre del lugar*] en 80 años más?”

El taller será usado como mecanismo para que los participantes puedan crear de manera deliberativa e inclusiva, una idea colectiva de cómo quieren que sea el futuro de su territorio. El hito más importante del taller no es solo alcanzar la visión compartida, sino que también, tiene por función identificar los pasos que se requieren para lograrla.

Durante el proceso, se espera que los participantes comprendan que habrá áreas en las que probablemente exista disenso y en otras, consenso. No obstante, esto será visto como una construcción propositiva de ideas, anhelos y recuerdos, ya que dicho intercambio pondrá en conocimiento sobre cómo distintos actores conciben el mismo problema, y más importante aún, si es posible dialogar en torno a ellos.

Se espera que durante el taller los participantes reflexionen sobre las implicancias que acarrea la visión que ellos han manifestado. Para procurar mantener la discusión en esa temática, se les proveerá de preguntas guías con la finalidad de que puedan considerar nuevos aspectos en la discusión. Si los participantes se han dividido en subgrupos, a medida que aparezcan resultados, estos serán presentados brevemente por ellos mismos para una retroalimentación entre participantes, para encontrar puntos de concordancia o de disidencia.

Dinámica del taller

Como se mencionó anteriormente, el taller tiene como eje central la escasez hídrica que afecta la cuenca, por lo cual un aspecto importante será manejar las expectativas de los participantes. Para ello, incitaremos a que las ideas que presenten sean aspiracionales, en el sentido de que pueden o no derivar en conceptos y escalas más amplias de discusión, como el espectro legal o del mercado, las que de todas maneras se dejarán registradas. Sin embargo, manteniendo siempre la precaución por parte de los ejecutores del taller de no empujar la conversación hacia escenarios imprácticos, irrealistas o pesimistas.

De manera general, la aplicación de este taller posee tres pasos principales:

- 1) Presentar información respecto a la seguridad hídrica, situación de sequía y proyecciones a futuro + preguntas (15-20 minutos)
- 2) Definir una imagen de futuro definida subgrupo, centrándonos en la idea de paisaje (15-20 minutos)

- 3) Definir los pasos requeridos para alcanzar dicha visión (30-35 minutos)
- 4) Crear una visión conjunta que represente a todos los subgrupos (15 minutos)

Para lograr el paso 1, primero se explicará a los participantes que el enfoque no está basado en los problemas que ellos identifiquen o conozcan, ya que estos son elementos negativos. Por ende, las energías deberán concentrarse en la búsqueda de una visión porque es algo positivo hacia lo cual aspirar. Para favorecer la discusión, se proponen las siguientes preguntas:

1. *¿Cómo sería su comunidad si tuvieran el poder de hacerlo como deseen?*
2. *¿Cómo se mantendría el aire, el agua y la tierra?*
3. *¿Cuál es el rol de las comunidades y de las autoridades en esta visión?*
4. *¿Qué paisaje quisiera que vieran sus hijos/nietos/cercanos en el futuro? ¿De qué manera es igual/distinto al actual?*

Finalmente, de la discusión que generen estas preguntas, se espera que los participantes concluyan el paso 1 con la creación y posterior registro de la visión correspondiente a cada subgrupo.

Una vez alcanzado el paso 1, se les pedirá a los subgrupos que imaginen que son miembros de un equipo que ha entregado de manera exitosa una estrategia que permite lograr la visión conjunta. Luego, describirán lo que significa para ellos haber alcanzado aquel logro. Con la finalidad de facilitar la discusión, se les entregarán algunas preguntas escritas en una cartulina, las cuales deberán responder apoyándose con notas adhesivas.

Algunas de las preguntas son:

1. *¿Qué hemos logrado?*
2. *¿Qué otros grupos (institucionales o no) de actores aparecen mencionados? ¿De qué manera se han beneficiado con lo que hemos hecho?*
3. *¿Se ha visto modificado el paisaje? ¿De qué manera? ¹⁵*
4. *¿De qué manera su comunidad aporta a lograr ese futuro ideal?*
5. *¿Cuáles proyectos/estrategias/ideas son necesarias dentro de esta visión?*
6. *¿Qué sitios deben ser protegidos/cambiados/modificados?*
7. *¿Qué hemos aprendido de nuestros éxitos y fracasos? ¹⁶*

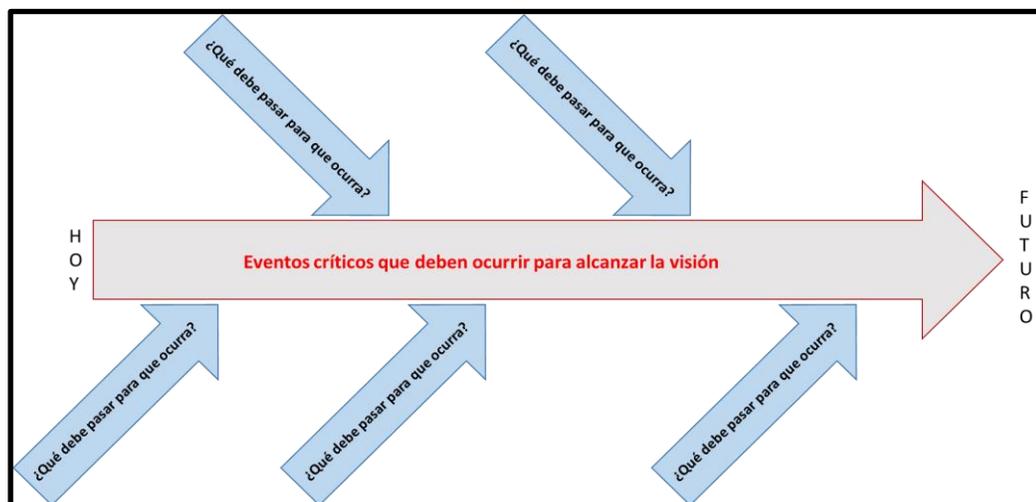
Como material de apoyo didáctico para esta sección, cada subgrupo trabajará en conjunto para construir una línea de tiempo que contenga las ideas claves para poder aplicar cambios/mejoras/mantenimiento para moverse desde el presente, hacia el

¹⁵ Para facilitar la comprensión de esta pregunta, se contará con material cartográfico de apoyo que muestre los principales usos de la tierra, junto con una pequeña explicación de qué es esta variable y su relevancia (podrá ser editado por los participantes).

¹⁶ También podrán ser usadas preguntas de la sección anterior.

futuro que ellos han descrito en el paso 1. A continuación, se presenta un formato tipo de la línea de tiempo (Ver Figura 1).

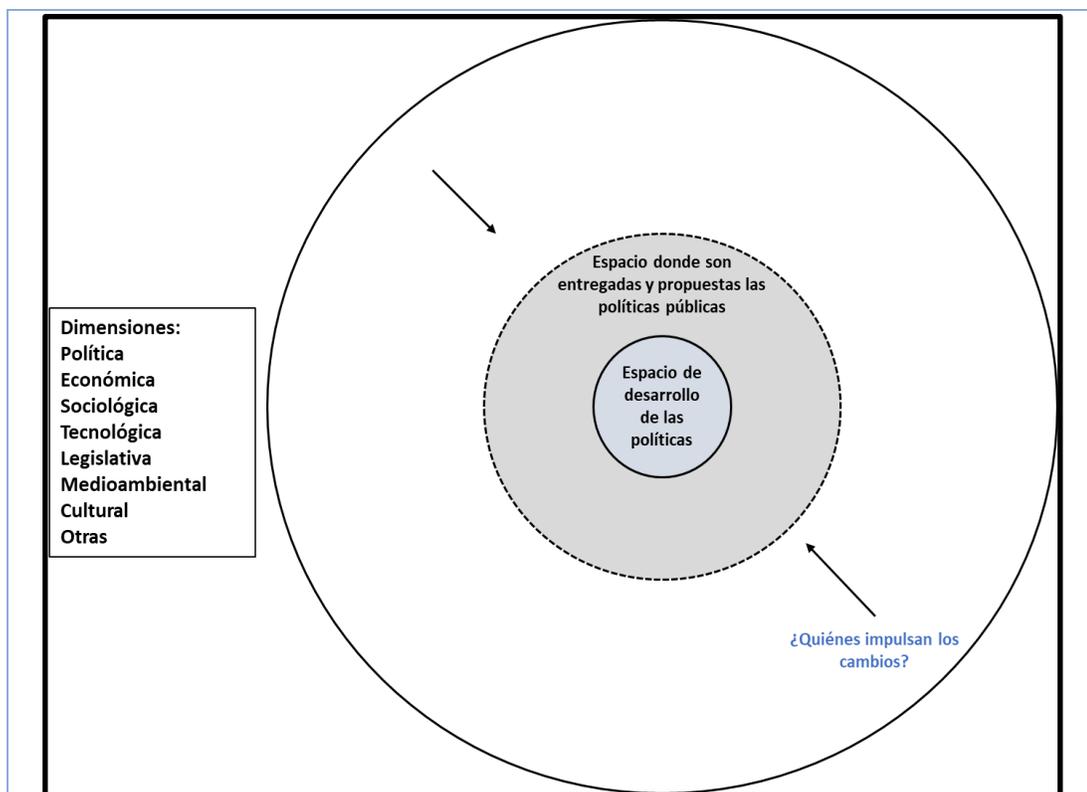
Figura 1. Esquema para la línea de tiempo.



Para cerrar esta fase, se invitará a los subgrupos a una sesión de retroalimentación, en la cual deberán presentar brevemente un resumen de sus resultados. En esta oportunidad, no se busca enfatizar en diferencias de opinión, pero sí es importante prestar atención en aquellos temas donde exista la posibilidad de compatibilizar ideas, porque estas facilitarán la transición al momento de crear la visión conjunta final. A partir de estas ideas compatibles, el equipo a cargo deberá proponer ideas generales que podrían estar en la visión final, para que luego, los participantes deliberen de manera libre y ordenada con respecto a la redacción final del grupo en su conjunto. En paralelo, los subgrupos podrán modificar sus líneas de tiempo de la manera que ellos estimen conveniente.

La penúltima parte se enfocará en que los participantes discutan en mayor detalle sobre los cambios/modificaciones/estrategias que estarían limitando o potenciando situaciones que dificulten o que favorezcan a los eventos críticos identificados en la línea de tiempo. En paralelo, se les solicitará completar un esquema ideado para simplificar la identificación de actores claves que estarían impulsando los cambios en la visión creada (Ver Figura 2) (25-30 minutos).

Figura 2. Diagrama del medioambiente global contextual.

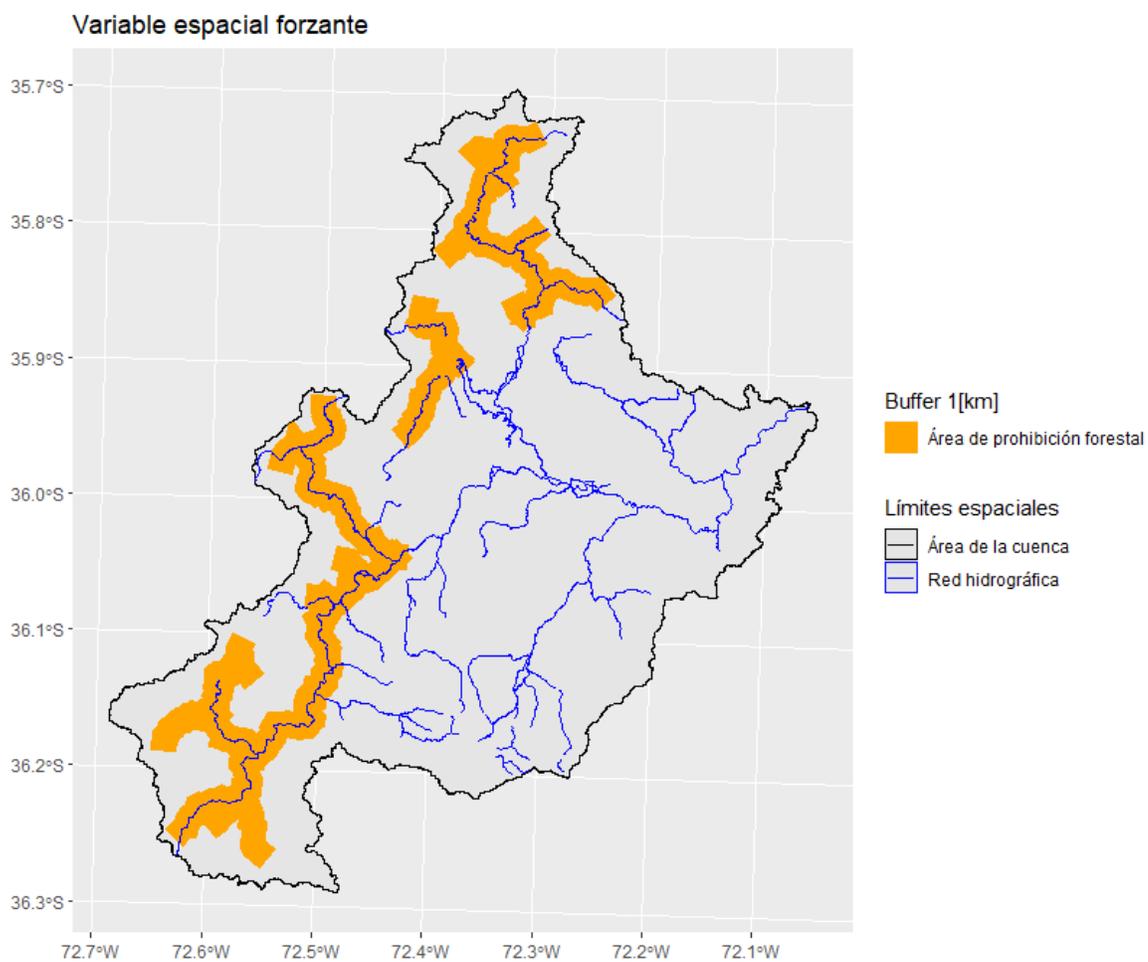


Una vez logrado el hito, se procederá con la actividad de cierre que tiene por propósito resumir la actividad y mencionar los resultados principales. Posteriormente, se dará la oportunidad a quienes deseen de transmitir su opinión y percepciones sobre el ejercicio (15 minutos).

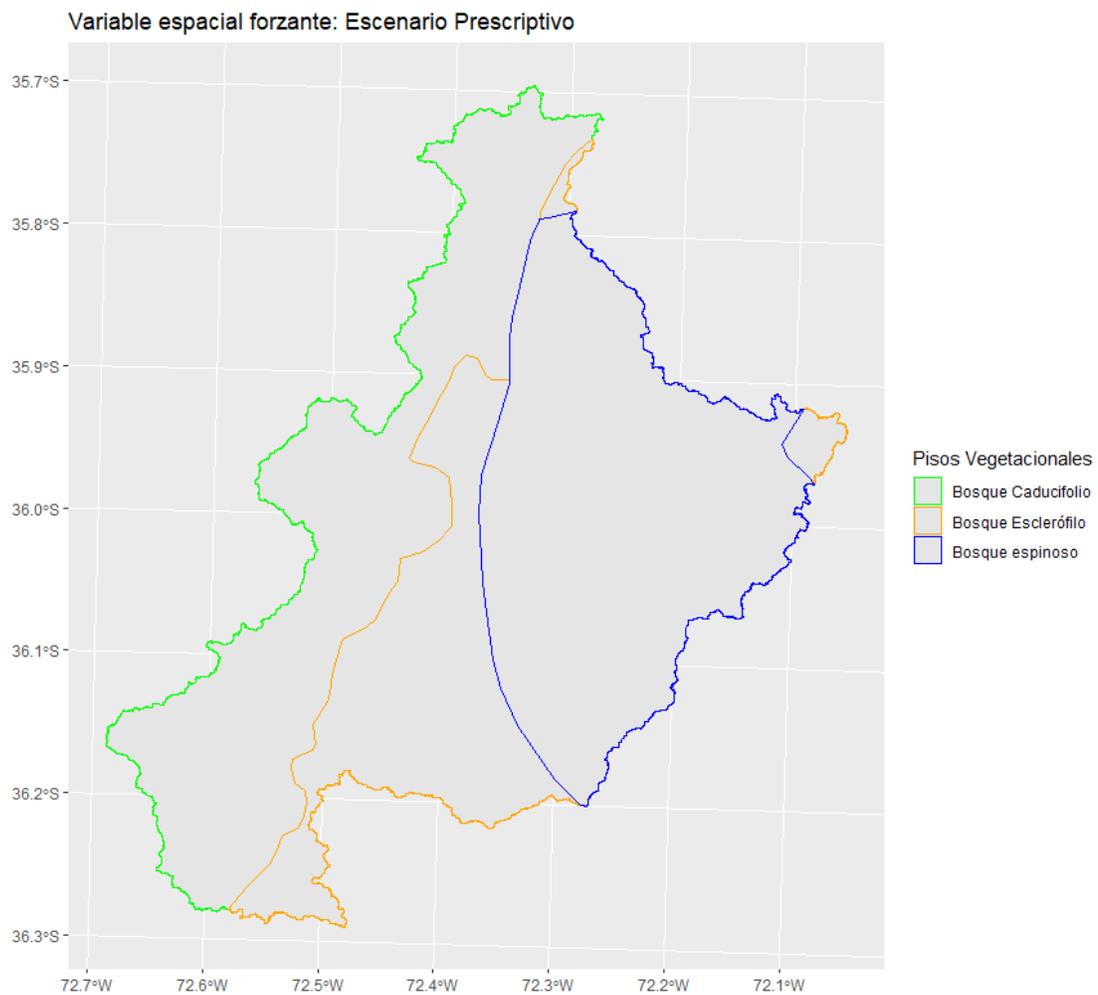
Algunas reglas para fomentar la participación

- Al menos todos participantes deben participar y expresarse, si existen personas tímidas, invitarlas a participar, para el caso contrario (personas muy participativas) controlar asertivamente su participación.
- Respetar los turnos de participación y pedir la palabra.
- Ante cualquier información adicional entregada por los participantes que sea necesario discutir en detalle, tomar nota de ella, y preguntar si es factible agendar una entrevista con la persona.

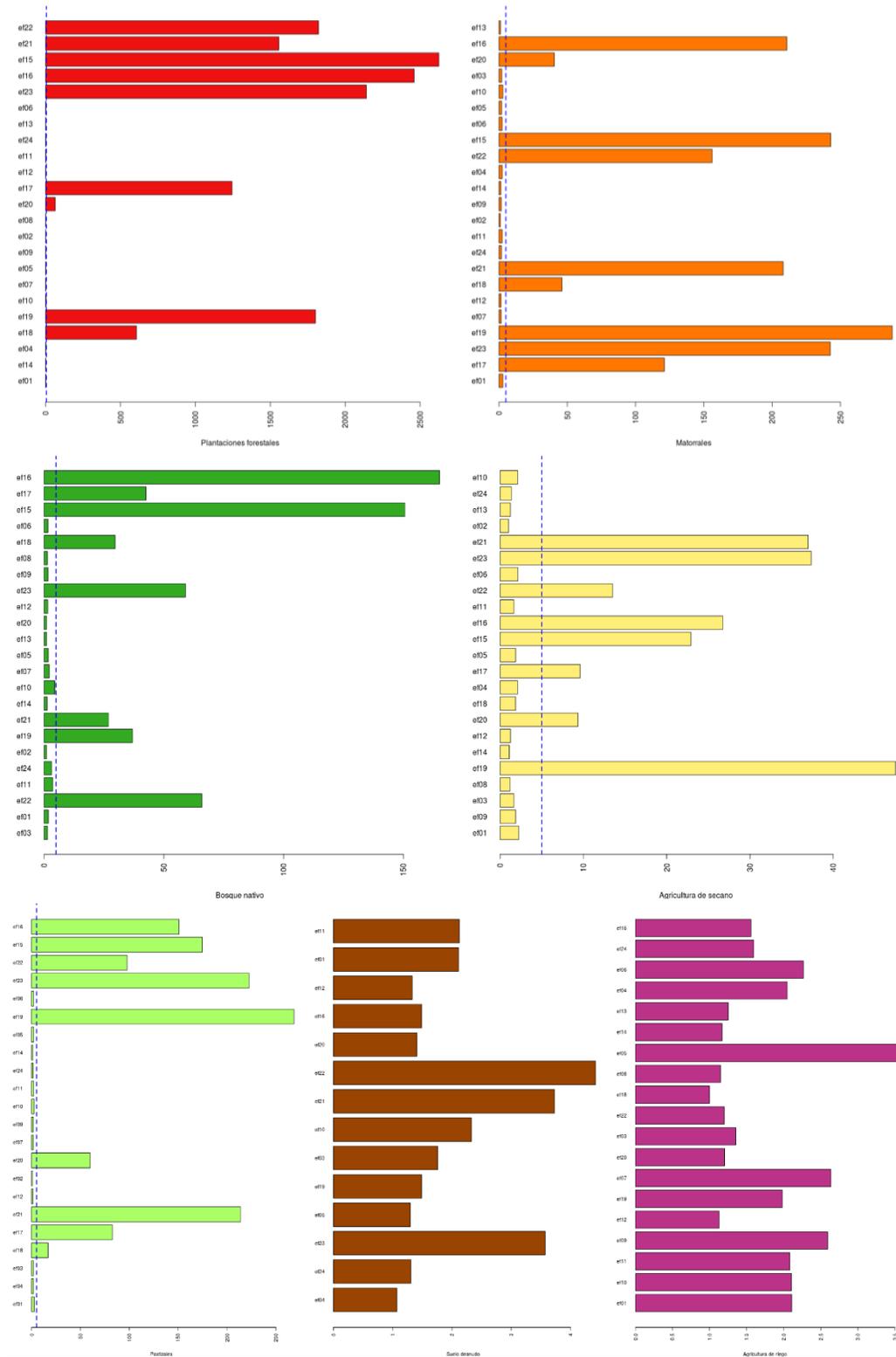
Apéndice 4. Variable forzante Escenario Discursivo. Dentro del área de restricción forestal solo podrá situarse matorrales o bosque nativo, según corresponda.



Apéndice 5. Variable forzante Escenario Prescriptivo. Los pisos vegetacionales definen áreas de conversión a bosque nativo o matorral.



Apéndice 6. Variables eliminadas por el factor de inflación de la varianza (VIF). La línea horizontal azul muestra el criterio de eliminación (VIF=5).



Apéndice 7. Regresiones logísticas para cada uso de suelo.

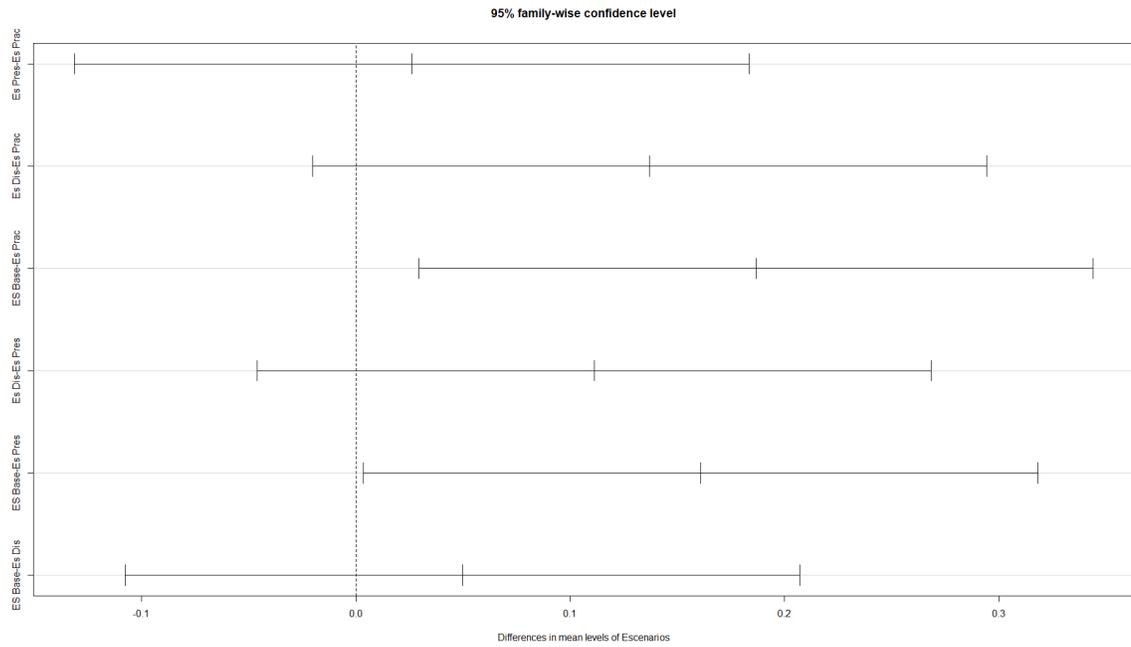
EF	Variable predictora	Bosque nativo	Agricultura de secano	Plantaciones forestales	Matorrales	Pastizales	Suelo desnudo	Agricultura de riego
ef01	Elevación	4,0E-03	-0,01556	7,0E-03	-0,003818	-8,5E-03	1,7E-03	-0,03789
ef02	Exposición	2,2E-03	2,0E-04	9,9E-04	-8,2E-04	-8,5E-04	-	-
ef03	Pendiente	0,1014	-0,1511		0,01496	-0,07052	0,02259	-0,08235
ef04	Distancia a red vial completa		-1,1E-04	3,6E-04	2,7E-04	-8,3E-04	-1,8E-03	-3,3E-04
ef05	Distancia a caminos pavimentados	-9,2E-05	-5,1E-05	6,4E-05	-6,6E-05	6,3E-05	-6,8E-05	1,8E-04
ef06	Distancia a caminos no pavimentados	2,2E-05	-1,5E-05	-6,3E-05	-1,8E-04	9,0E-05		2,0E-04
ef07	Distancia a industrias forestales	-9,5E-05		-6,0E-05	3,6E-05	2,3E-05		-1,0E-04
ef08	Distancia a cursos de agua	2,3E-05	-1,1E-04	3,7E-05				-7,7E-05
ef09	Distancia a zonas urbanas	2,8E-05	-1,0E-04	3,8E-05	2,9E-05	-2,0E-05		1,0E-04
ef10	Distancia a canales de riego	-8,0E-05	3,6E-08	3,0E-05	1,8E-05	4,0E-05	-6,6E-05	-2,9E-04
ef11	Distancia a tranques y embalses de riego	2,3E-04	1,6E-05	2,0E-05	-2,2E-05	-8,4E-05	5,2E-05	-2,5E-04
ef12	Superficie de predios [ha]	8,5E-05	1,4E-04	2,0E-05	-8,0E-05	-5,0E-05	-9,3E-05	2,2E-04
ef13	Superficie de riego [m^2]	-1,7E-05	-5,3E-07	-3,0E-06	5,6E-07			-1,8E-06
ef14	Superficie de secano [m^2]	-3,7E-08	-5,1E-08	5,6E-08	-1,8E-08	-1,52E-08		3,6E-08
ef15	Erosión: Ligera							
ef16	Erosión: Moderada						-0,3552	-0,2004
ef17	Erosión: Severa							
ef18	Erosión: Muy severa		-1,669					-12,91
ef19	Erosión: Sin erosión						-0,3996	0,3821
ef20	Profundidad: Delgado	-13,3					-2,511	-0,6055
ef21	Profundidad: Ligeramente profundo						-2,385	
ef22	Profundidad: Moderadamente profundo						-2,141	0,5448
ef23	Profundidad: Profundo						-2,752	
ef24	Índice de vejez	0,04223	0,005194		6,7E-05	-0,01507	0,08107	-0,02383
Intercepto		-4,586	1,793	-4,492	0,5507	1,681	-1,559	3,881

Apéndice 8. Resumen de superficies asignadas y los cambios relativos con respecto al mapa de coberturas simulado.

Categorías simuladas	Escenario Base		Escenario Discursivo			Escenario Práctico			Escenario Prescriptivo		
	ha	%	ha	%	Cambio (%)	ha	%	Cambio (%)	ha	%	Cambio (%)
Bosque Nativo	11886,3	6,7%	29610,9	16,7%	10,0%	12057,3	6,8%	0,1%	46602,9	26,4%	19,7%
Agricultura de secano	8715,6	4,9%	13463,1	7,6%	2,7%	8181	4,6%	-0,3%	10747,8	6,1%	1,2%
Plantaciones forestales	48870,9	27,6%	21156,3	11,9%	-15,6%	67551,3	38,1%	10,5%	3,6	0,0%	-27,6%
Matorrales	71496,9	40,3%	87020,1	49,1%	8,8%	57627	32,5%	-7,8%	108804,6	61,7%	21,1%
Pastizales	27905,4	15,7%	17548,2	9,9%	-5,8%	16159,5	9,1%	-6,6%	5643,9	3,2%	-12,5%
Suelo desnudo	4204,8	2,4%	4823,1	2,7%	0,3%	4458,6	2,5%	0,1%	4500	2,6%	0,2%
Agricultura de riego	4147,2	2,3%	3605,4	2,0%	-0,3%	11192,4	6,3%	4,0%	24,3	0,0%	-2,3%

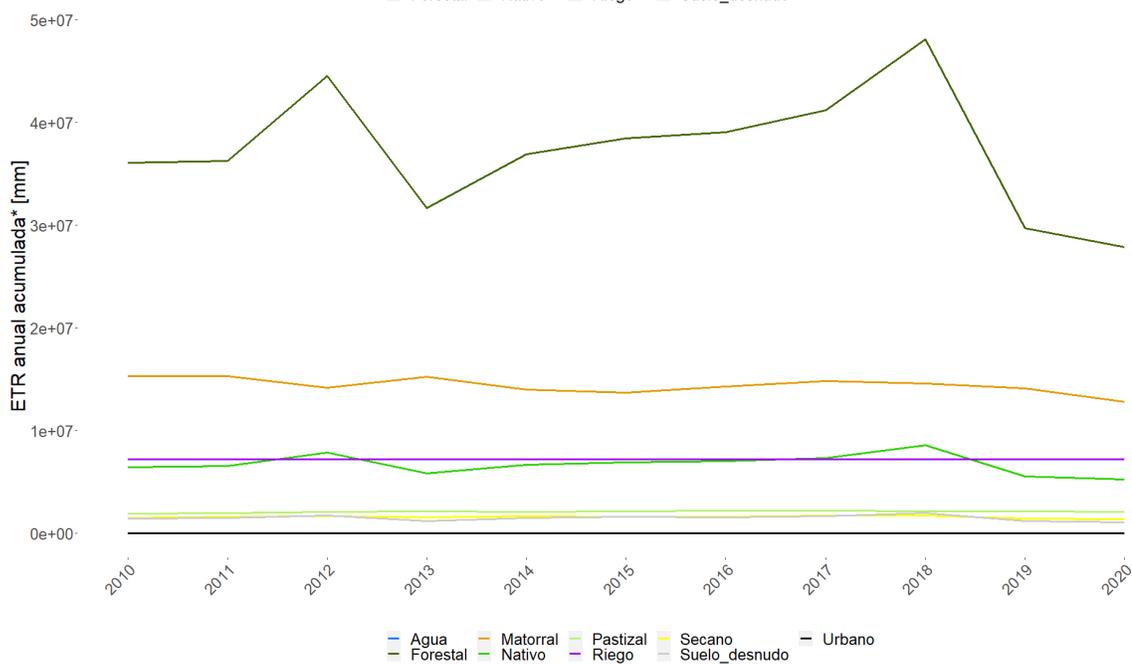
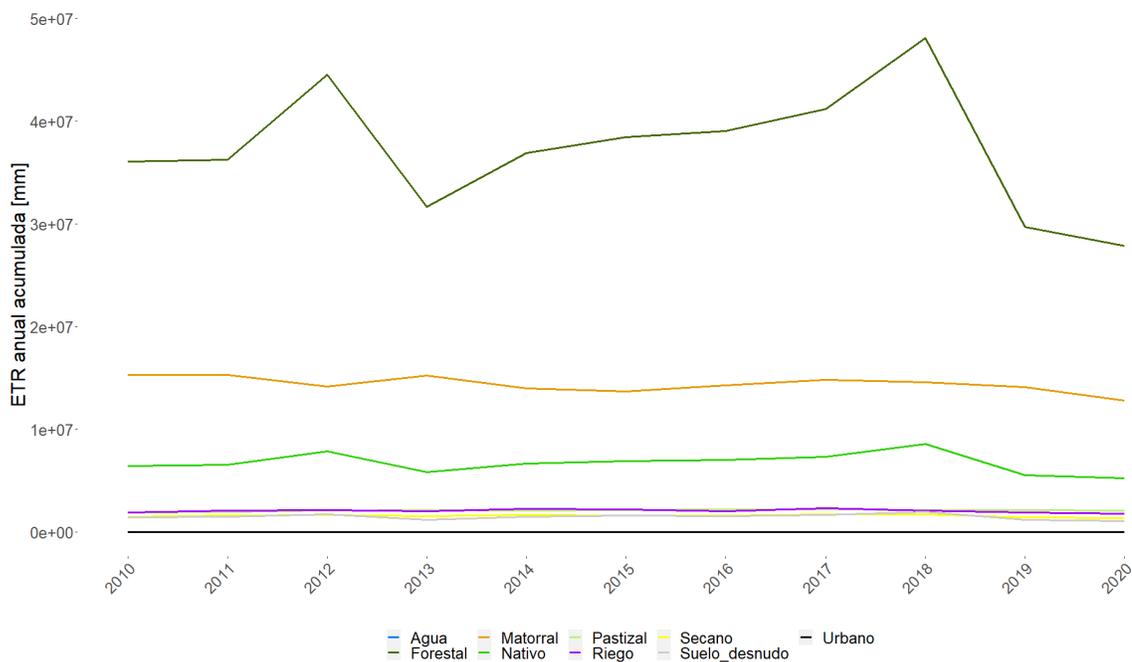
El cambio ($\Delta\%$) es con respecto a la superficie de la misma cobertura correspondiente al mapa simulado del 201

Apéndice 9. Prueba HDS de Tukey para la identificación de diferencias significativas entre los caudales simulados para cada escenario.



El eje de las abscisas representa las diferencias entre los niveles de la prueba de Tukey, en este caso cada nivel.

Apéndice 10. ETr anual acumulada para el Escenario Práctico bajo distintos valores de ETr para la clase agricultura de riego (Primera imagen original, segunda imagen asumiendo un valor de ETr de 580 mm).



Apéndice 12. ETr anual acumulada para el Escenario Prescriptivo.