



Universidad del Desarrollo

Facultad de Ingeniería

**Desarrollo de modelo Socio-hidrológico de acceso al agua potable en Servicios
Sanitarios Rurales en Chiloé.**

Magister en Ciencias de la Ingeniería

Autora: Camila Sandoval

Tutor: Diego Rivera

Cotutora: Petra Wallem

Enero, 2026

Resumen

Esta tesis desarrolla un modelo socio-hidrológico para analizar el acceso al agua potable en los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) de la Isla Grande de Chiloé, en un contexto de creciente escasez hídrica donde el cambio climático interactúa con factores sociales, institucionales y de gobernanza. En contraste con la alta cobertura urbana, una proporción significativa de la población rural depende de sistemas comunitarios con limitaciones técnicas y organizacionales, situación que en Chiloé se ve acentuada por la estacionalidad de la demanda, la alta dependencia de las precipitaciones y las presiones derivadas del cambio de uso de suelo y el crecimiento demográfico.

El estudio se sustenta en el marco de los Sistemas Socio-Ecológicos y la sociohidrología, entendiendo el acceso al agua como el resultado de interacciones complejas entre componentes ecológicos y sociotécnicos. Metodológicamente, se desarrolló un estudio piloto en siete comunas de la isla, integrando revisión bibliográfica, datos climáticos y ambientales, registros institucionales y trabajo de campo mediante entrevistas y encuestas a directivas de SSR. Con esta información se construyó un modelo socio-hidrológico jerárquico, organizado en subsistemas interrelacionados, y se aplicó un análisis exploratorio de datos y modelos estadísticos para evaluar la influencia de distintas variables sobre la cantidad, calidad y continuidad del suministro.

Los resultados muestran que la producción de agua se asocia principalmente a la cobertura del sistema y la demanda, mientras que la degradación de ecosistemas, especialmente la pérdida de turberas y cobertura natural se relaciona negativamente con la disponibilidad hídrica. Asimismo, se evidencia que las capacidades organizacionales, el estado de la infraestructura y el acceso a redes de apoyo influyen de manera relevante en la continuidad y calidad del servicio, modulando los efectos de las limitaciones biofísicas. En conjunto, el estudio confirma que el acceso al agua en los SSR de Chiloé no depende exclusivamente de condiciones hidrológicas, sino de la interacción entre el entorno ecológico y la fortaleza institucional y comunitaria, aportando un diagnóstico integrado para la planificación local y el diseño de estrategias de gestión hídrica más equitativas y sostenibles.

Glosario ciclo hidrológico

Evapotranspiración: Es la combinación de la evaporación del agua desde superficies abiertas (océanos, lagos, ríos, suelos) y la transpiración de las plantas, que liberan vapor de agua a través de los estomas. Este proceso convierte el agua líquida en vapor, transfiriéndola a la atmósfera y participando en la formación de nubes.

Precipitación: Es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre en forma líquida (lluvia) o sólida (nieve, aguanieve, granizo). Resulta de la condensación del vapor de agua en la atmósfera cuando alcanza saturación y forma gotas o cristales que se vuelven lo suficientemente pesados para caer. Es el principal mecanismo de retorno del agua desde la atmósfera hacia el suelo y cuerpos de agua.

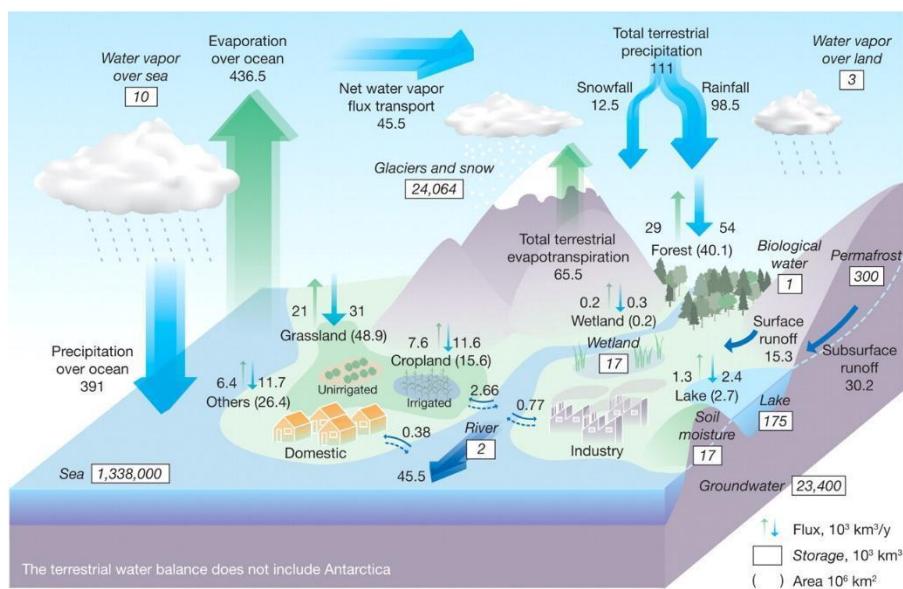


Diagrama conceptual de la dinámica hídrica global (Fuente: Oki & Kanae, 2006)

Escorrentía: Es el flujo de agua sobre la superficie terrestre hacia ríos, lagos y océanos, resultado de la precipitación que no se infiltra ni se evapora. La escorrentía transporta sedimentos, nutrientes y contaminantes y puede causar erosión.

Sublimación: Es la transformación directa del agua sólida (hielo o nieve) en vapor, sin pasar por el estado líquido. Ocurre en zonas frías y secas, como glaciares y cumbres montañosas, donde las condiciones de temperatura y presión favorecen este proceso.

Infiltración: Es la penetración del agua en el suelo desde la superficie, recargando la humedad del suelo y los acuíferos subterráneos. Su magnitud depende de la textura del suelo, la cobertura vegetal, la pendiente y la intensidad de la precipitación.

Deshielo: Es el proceso por el cual la nieve y el hielo almacenados en la criósfera se derriten durante temporadas cálidas, aportando agua a ríos, lagos y acuíferos. Es crucial en zonas montañosas y polares, donde regula el caudal estacional y el suministro de agua.

Intercepción: Es la captura de parte de la precipitación por la vegetación, hojas, ramas o troncos. Parte del agua interceptada se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto puede llegar al suelo como escorrentía.

Flujo subterráneo: Es el movimiento del agua infiltrada a través del suelo y los acuíferos profundos. Puede tardar desde días hasta miles de años en reaparecer en la superficie, contribuyendo al flujo de ríos, manantiales y zonas costeras.

Ascenso capilar: Es el movimiento del agua desde capas profundas del suelo hacia la superficie a través de los poros del suelo, impulsado por fuerzas capilares. Es especialmente importante en regiones áridas, donde la vegetación depende de este flujo para sobrevivir.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo General.....	9
2.2 Objetivos Específicos.....	9
3. MARCO TEÓRICO.....	10
3.1. Socio-ecología.....	10
3.2 Socio-hidrología.....	11
3.2.1. Modelaciones Socio-hidrológicas.....	13
3.4 Contexto histórico-normativo del suministro de agua potable rural en Chile.....	16
4. METODOLOGÍA.....	20
4.1. Área de estudio.....	20
4.2. Construcción del modelo socio hidrológico de la Isla Grande de Chiloé.	26
4.2.1. Instrumentos de levantamiento de información a partir del modelo.	28
4.2.2. Metodología de terreno y sistematización de base de datos.....	28
4.3. Análisis exploratorio de datos.....	30
5. RESULTADOS.....	32
5.1. Modelo Socio-hidrológico jerárquico para Isla Grande de Chiloé.....	32
5.2. Análisis exploratorio de datos.....	2
5.2.1 Cantidad: Agua Producida.....	2
5.2.2 Calidad: Ocurrencia de Problemas de calidad.....	13
5.2.3. Continuidad de suministro: Percepción de la Interrupción del suministro.....	21
5.2.3.1 Causas de la interrupción.....	30
5.2.3.2 uso del agua.....	33
5.3. Modelos de regresión lineal múltiple.....	36
5.3.1 Cantidad: Agua Producida.....	37
5.3.2 Calidad: Ocurrencia de problemas de calidad.....	38
6. DISCUSIÓN.....	45
7. CONCLUSIONES.....	53
8. REFERENCIAS.....	55

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que la cantidad de agua total en la Tierra es de 1.386 millones de km³, volumen que en la historia de la Tierra no ha variado significativamente, ni se espera que lo haga en una escala geológica próxima (Anderson et al., 2005). En la actualidad, el 97,5 % del volumen total de agua del planeta corresponde a agua salada, mientras que solo el 2,5 % es agua dulce. De esta fracción, aproximadamente el 68,7 % se encuentra almacenado en casquetes polares, glaciares y nieves permanentes, el 30,1 % corresponde a agua dulce subterránea, y apenas el 1,2 % restante constituye agua superficial disponible, la cual sostiene los procesos fisiológicos vitales de los organismos y circula a través de ríos, lagos, humedales y la atmósfera (Shiklomanov & Rodda, 2003; Rakesh, 2023).

La gestión inadecuada de los recursos naturales y transformaciones antrópicas de los paisajes han alterado los ciclos hidrológicos a escala local y global, acentuando la variabilidad espacial y temporal en la disponibilidad de agua para consumo humano (Conway et al., 2009; Dai et al., 2007). Adicionalmente, los modelos de predicción de cambio climático indican una aceleración de los ciclos hidrológicos, fenómeno que se manifiesta con la disminución o aumento del promedio de las precipitaciones anuales, episodios más intensos e intermitentes de lluvia, y adelantamiento de inundaciones primaverales, sumado a un aumento del volumen causado por una elevación de la isoterma que genera lluvias en cotas elevadas y consecuentes deshielos (Wu et al., 2013; Yang et al., 2021; Wang et al., 2023; Ehtasham et al., 2024).

Ante estos escenarios, la escasez de agua para consumo humano constituye una preocupación mundial y a pesar de las metas propuestas para alcanzar la seguridad hídrica, el Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de 2024, “Water for prosperity and peace (UNESCO, 2024)” advierte que la falta de agua tiene el potencial de afectar la paz mundial. En Chile, la literatura reciente plantea que la crisis hídrica tiene una doble raíz: por un lado, causas físicas (sequía, variabilidad climática); por otro, causas construidas socialmente¹, es decir, procesos político-económicos que configuran la asignación, regulación y gestión del recurso hídrico (Oppliger et al. 2019). Sin embargo, los autores de

¹ Escasez social o socialmente construida, donde la falta de agua resulta de factores políticos, económicos y de gestión: apropiación y distribución desigual, fallas institucionales, contaminación antrópica, usos de suelo forestales, etc.

este artículo subrayan que la dimensión antrópica ha sido a menudo invisibilizada: “al descontextualizar las relaciones de poder y las escalas territoriales, se tiende a explicar la escasez sólo en términos meteorológicos, obviando la influencia de decisiones de política pública, usos productivos y ordenamiento territorial.”

En esa línea, diversos estudios documentan mecanismos concretos que han agravado la vulnerabilidad hídrica, como, por ejemplo, la expansión de plantaciones forestales exóticas y la deforestación del bosque nativo (que alteran la capacidad hídrica del paisaje), deficiencias en la fiscalización e institucionalidad, y la mercantilización del agua, facilitada por el marco jurídico heredado del Código de Aguas de 1981 (Hinojosa & Budds, 2013; Rivas-Ponce, 2022; Ochoa et al., 2016). Hinojosa & Budds (2013) muestra cómo los derechos privados de aprovechamiento han contribuido a consolidar asimetrías de poder entre grandes actores, limitando la intervención estatal efectiva; mientras que diversos autores advierten que la priorización del consumo productivo y la expansión de infraestructura dirigida a usos extractivos han perpetuado la vulnerabilidad de comunidades rurales y el incumplimiento de derechos básicos establecidos en la constitución del país (Rojas y Fragkou 2021, De la Cuadra, 2013; Taddei, 2023).

Los diagnósticos nacionales aportan cifras que ilustran la magnitud del problema y su carácter híbrido (biofísico y social). El estudio “Transición Hídrica: El Futuro del Agua en Chile” reporta que aproximadamente el 44% de los problemas hídricos del país se derivan de fallos en la gestión y gobernanza; un 17% está asociado a la expansión de actividades productivas y a la sobreasignación de derechos de agua; un 21% responde a contaminación (agroquímica, pasivos mineros, falta de saneamiento) y daños ambientales; y solo un 12% se atribuye directamente a la disminución de la oferta por reducción de precipitaciones, retroceso de glaciares y sobreexplotación de acuíferos. Estas cifras sugieren que abordajes exclusivamente tecnocráticos son insuficientes si no se evalúa la efectividad de las estrategias de gobernanza y gestión ambiental.

En este contexto, los sectores rurales enfrentan mayores desafíos, ya que la disminución de precipitaciones se combina con la limitada infraestructura para la provisión de agua potable, lo que expone a miles de personas a una alta vulnerabilidad. Según la encuesta Casen de

2017, la población rural se concentra mayoritariamente en la zona del Centro- Sur de Chile, superior el 28% en las regiones de: O'Higgins, El Maule, Ñuble, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos². Estudios demográficos y diagnósticos territoriales muestran que gran parte de la población rural depende de fuentes informales (pozos, norias, vertientes, captaciones prediales) sin sistemas de potabilización ni redes seguras (Censo 2017; Fundación Amulen, 2019). A diferencia de lo que ocurre en la zona urbana en donde la cobertura de la red de suministro de agua potable es cercana al 99%³, alrededor del 47% de la población rural no cuenta con un sistema formal de abastecimiento de agua domiciliaria, y se organiza mediante sistemas individuales o colectivos (comités, cooperativas u otras formas comunitarias) para su abastecimiento. Esta población enfrenta problemas específicos que ponen en riesgo la continuidad del suministro: estacionalidad marcada, dependencia de fuentes no reguladas, deterioro y falta de inversión en pequeñas infraestructuras, escasa profesionalización de la gestión hídrica, y exposición a presiones productivas (forestal, agropecuaria, acuícola) que alteran la disponibilidad y calidad del recurso.

En el plano jurídico-político, la consagración constitucional del derecho humano al agua y al saneamiento (Ley N.º 21.431, 25 de enero de 2022), formaliza la responsabilidad estatal de resguardar el uso del agua para consumo humano y saneamiento. Sin embargo, su implementación efectiva en contextos rurales se ve limitada por la dispersión institucional, capacidades técnicas reducidas a escala local, vacíos en la fiscalización y conflictos entre derechos de aprovechamiento y necesidades domésticas.

Por todo lo anterior, resulta necesario un estudio que identifique y pondere sistemáticamente los factores y variables determinantes para la continuidad del suministro de agua potable en los servicios sanitarios rurales de Chile. En esta tesis, el acceso al agua potable se entiende de manera operativa como un resultado multidimensional, compuesto por tres dimensiones interdependientes: cantidad (volumen disponible/producción), calidad (ocurrencia de problemas que afectan la potabilidad) y continuidad del suministro (frecuencia de interrupciones).

² Ministerio de Desarrollo Social, Encuesta Casen 2017.

³ Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). 2022. Informe de Coberturas Sanitarias. Disponible en: <https://c.bcn.cl/jxJNrV> [Recuperado el 10 de septiembre de 2025]

La presente tesis aborda este desafío a través de un estudio piloto en la región de los Lagos, provincia de Chiloé, específicamente para siete comunas de la Isla Grande de Chiloé. El estudio busca aportar un diagnóstico detallado que permita caracterizar los factores críticos, considerando la complejidad de sus interacciones y las particularidades del sistema. Para ello, se desarrollará un modelo socio hidrológico considerando los Servicios Sanitarios Rurales como foco central de análisis. Se espera que los resultados sirvan como insumo para la planificación local y/o propuestas de mejora en la gestión hídrica de la Isla Grande de Chiloé. En este marco, la tesis se guía por la siguiente hipótesis: *El acceso al agua, en los Servicios Sanitarios Rurales de la Isla Grande de Chiloé están determinadas principalmente por la interacción entre factores ecológicos y capacidades organizacionales e institucionales, de modo que las limitaciones biofísicas se ven amplificadas o mitigadas según la fortaleza sociotécnica de cada sistema.*

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo socio-hidrológico del acceso al agua potable en Servicios Sanitarios Rurales de la Isla Grande de Chiloé, identificando los factores ecológicos, institucionales, operacionales y comunitarios relevantes que influyen en la cantidad, calidad y continuidad del suministro.

2.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar y estructurar un modelo sociohidrológico que represente las interacciones entre los componentes ecológicos, institucionales, operacionales y comunitarios vinculados al acceso al agua potable en los SSR.
2. Levantar, integrar y sistematizar la información necesaria para el estudio, tanto de gabinete como a partir de entrevistas, construyendo una base de datos que permita analizar cada componente del modelo sociohidrológico.
3. Analizar las relaciones entre las variables ecológicas, institucionales, operacionales y comunitarias mediante un análisis exploratorio de datos, coherente con el modelo sociohidrológico propuesto.

4. Identificar los factores que modulan la cantidad, calidad y continuidad del agua potable a través de modelos bivariados y trivariados consistentes con el marco sociohidrológico.

3. MARCO TEÓRICO

El marco teórico sobre el cual se construye esta tesis corresponde a la Socioecología y específicamente, una rama de ésta: la Sociohidrología. Esta línea de investigación fusiona las ciencias ecológicas con las ciencias sociales, entendiendo que existe una estrecha relación en la regulación de los ecosistemas con las dinámicas sociales que en ellos se establecen.

3.1. Socio-ecología

El estudio de Sistemas Socio-Ecológicos (SSE) surge como una respuesta a la necesidad de comprender de manera integrada las relaciones entre los ecosistemas y los seres humanos que los habitan. En sus orígenes la ecología intentó estudiar las dinámicas de poblaciones e interacciones entre especies en forma aislada, buscando construir modelos deterministas y lineales de su comportamiento. En 1973 C.S. Holling introduce el concepto de resiliencia ecológica, entendida como la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y mantener sus funciones básicas. Su propuesta marcó un giro en el entendimiento de las dinámicas que estudia la ecología de comunidades, dado que pone en evidencia que los sistemas ecológicos no tienen un comportamiento lineal ni son deterministas. Su propuesta enfatiza en la adaptabilidad y por tanto incertidumbre propia de estos sistemas, concibiendo su resiliencia como esa capacidad de ajustarse continuamente a cambios ambientales, manteniéndose dentro de ciertos umbrales críticos (Holling, 1973; Kumar et al., 2021). Las implicancias prácticas de estas propuestas se ven reflejadas en el surgimiento de enfoques adaptativos para la gestión de los recursos naturales, que priorizan identificar los puntos de inflexión o colapsos de las poblaciones de especies, donde una alteración ambiental puede llevar a un sistema a superar su capacidad de resiliencia.

Como un proceso natural de este cambio de paradigma, la socioecología surge como una propuesta integradora de las dinámicas ecológicas y sociales, abordando temáticas como ecología, economía ambiental, sociología y políticas públicas en un modelo sistémico de un territorio dado. Diversos autores han contribuido a consolidar el estudio de los SSE,

destacando los trabajos de Fikret Berkes, Carl Folke y C.S. Holling, quienes profundizaron en la noción de resiliencia ecológica y en la necesidad de integrar la dimensión social para comprender la gestión de los recursos naturales (Berkes & Folke, 1998; Holling, 2001, Gunderson & Holling 2002, Ostrom 2009).

El concepto de SSE fue utilizado por primera vez por Berkes y Folke (1998), quienes propusieron la idea de “el ser humano en la naturaleza”, superando la visión reduccionista que separaba lo social de lo ecológico. Desde esta perspectiva, los SSE se entienden como sistemas adaptativos complejos (SAC) en los que interactúan agentes sociales y biofísicos en múltiples escalas espaciales y temporales (Janssen & Ostrom, 2006). Los atributos de estos SAC son su no linealidad, su capacidad de autoorganizarse, su jerarquía interna, su comportamiento caótico - catastrófico, y multiescalar, y equilibrio dinámico que les permite adaptarse ante los cambios permanentes de su entorno (Holling, 2001; Costanza & Jorgensen, 2002; Smit & Wandel, 2006).

Uno de los aportes más influyentes en el marco de los SSE proviene de Elinor Ostrom (1990), quien cuestionó la visión determinista de la “tragedia de los comunes”. A partir de estudios empíricos, demostró que las comunidades locales son capaces de autoorganizarse y gestionar de manera sostenible los recursos naturales comunes, mediante reglas colectivas, sanciones internas y arreglos institucionales adaptados a cada contexto territorial. Su trabajo evidenció que no existe una “panacea” universal, sino múltiples formas de gobernanza que reconocen la diversidad institucional y cultural, como base para comunidades resilientes. Posteriormente, Ostrom (2009) consolidó un enfoque metodológico policéntrico y multinivel, para analizar la sostenibilidad de los socioecosistemas.

3.2 Socio-hidrología

En un principio el abordaje de la gestión hídrica de una cuenca o localidad se basaba en el estudio de los modelos hidrológicos convencionales, los cuales han aportado significativamente al entendimiento de la dinámica del ciclo hidrológico en distintas escalas. No obstante, este enfoque, basado en sistemas aislados y en condiciones ideales, tiende a reducir la no linealidad y estocasticidad propia de sistemas complejos adaptativos y excluir la participación humana en su regulación. Esta limitación ha impedido que las ciencias del

agua respondan de manera adecuada a los desafíos de la gestión sostenible de los recursos hídricos.

La Sociohidrología surge como una disciplina emergente dentro del marco conceptual de los SSE, con el propósito de ofrecer soluciones a problemas como escasez de agua, inundaciones, sequías, conflictos sociales y degradación de ecosistemas acuáticos. Su enfoque se centra en las interacciones entre sistemas humanos y el ciclo hidrológico, considerando cómo las decisiones sociales afectan los recursos hídricos y, a su vez, cómo éstos condicionan las dinámicas sociales.

La complejidad de estas interacciones se ha vuelto más evidente con la integración de políticas orientadas a la sostenibilidad, que con frecuencia generan dilemas difíciles de resolver. Un ejemplo ilustrativo es la asignación del recurso hídrico entre el uso agrícola intensivo y la conservación de humedales. Cuando los caudales se desvían para riego, los humedales o ecosistemas acuáticos aguas abajo pueden degradarse. Esto genera tensiones entre actividades productivas, iniciativas de conservación de la biodiversidad y necesidades humanas básicas. Este tipo de situaciones refleja cómo factores ecológicos, socioeconómicos y éticos interactúan de manera continua, cuestionando la separación del rol de la hidrología y las ciencias sociales en la comprensión de los problemas hídricos (Sivapalan et al., 2012).

Tomando este desafío, la sociohidrología aborda la coevolución entre sociedad y agua, reconociendo retroalimentaciones entre ambos elementos como parte de un sistema integrado. Formalizada por Murugesu Sivapalan en 2012, este marco conceptual ofrece una aproximación metodológica interdisciplinaria que permite predecir la dinámica de los sistemas humano-agua a largo plazo y apoyar la gestión sostenible frente a incertidumbres, conflictos y dilemas éticos. A diferencia de enfoques centrados en la optimización del recurso, la sociohidrología busca comprender estas interdependencias y anticipar dinámicas futuras. Su objetivo es analizar cómo las decisiones humanas afectan la disponibilidad y calidad del agua y cómo, a su vez, las condiciones hídricas condicionan las acciones sociales (Xia et al., 2022).

La disciplina ha avanzado principalmente mediante la modelación de sistemas para anticipar las consecuencias de distintas decisiones de gestión. Pande y Sivapalan (2016) identifican

tres aproximaciones metodológicas: i) histórica, que reconstruye la evolución conjunta de sociedades y sistemas hídricos; ii) comparada, que analiza diferencias culturales y regionales en la relación humano-agua; y iii) de procesos, basada en modelos matemáticos que simulan retroalimentaciones y dinámicas coevolutivas. Con base en estas aproximaciones, la sociohidrología permite:

- Reconstruir procesos históricos, identificando cómo cambios políticos, tecnológicos y culturales han modelado la gestión del agua.
- Predecir y planificar escenarios futuros, mediante modelos que exploran posibles trayectorias en la interacción humano-agua.
- Apoyar la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH), al mostrar cómo políticas y prácticas humanas impactan los sistemas hídricos y cómo éstos condicionan la acción social.

Para ello, utiliza herramientas de simulación de escenarios y evaluación multicriterio, integrando información diversa para guiar la toma de decisiones (Melsel et al., 2018; Yu et al., 2022).

3.2.1. Modelaciones Socio-hidrológicas

Un modelo conceptual es una herramienta diagramática que, de forma simplificada, permite representar una realidad o fenómeno de alta complejidad (Jahn et al., 2009; Jopp et al., 2011). Su principal relevancia radica en su capacidad de capturar relaciones esenciales, tanto directas como emergentes, entre los componentes que conforman un sistema (Fath & Jørgensen, 2011). La modelización es un proceso de construcción de conocimiento epistemológico, conceptual y metodológico que facilita la investigación y análisis de sistemas complejos (Rodríguez, 2018). Puede ser participativa e integradora, donde la validez y legitimidad del conocimiento generado depende de su capacidad de integrar las visiones de diferentes actores sociales (Berkes, et al 2000). Así, los modelos son específicos y deben aplicarse a los sistemas explícitos para los cuales fueron generados (Blanco, 2013). También pueden anticipar escenarios y adaptarse mediante la incorporación de nuevas competencias, ya sea derivadas de su aplicación práctica o de fuentes externas (Cardozo et al., 2013; Ruiz et al., 2013).

En general, los modelos se estructuran a partir de tres elementos básicos: fenómenos, entendidos como procesos físicos o sociales que alteran el estado de un sistema (por ejemplo, la precipitación o la toma de decisiones colectivas); variables, valores que describen cuantitativamente un fenómeno, como el caudal en un río; y parámetros, características relativamente estables del sistema, tales como la pendiente, el área de una cuenca o el tipo de suelo (Rebaudo & Dangles, 2014). Sin embargo, la construcción de modelos enfrenta un dilema descrito por Levins (1966), conocido como el compromiso (trade-off) entre realismo, generalidad y precisión. Según este autor, ningún modelo puede maximizar simultáneamente estas tres propiedades: un modelo muy realista, requiere de un gran número de antecedentes respecto de las variables y procesos a modelar y tiende a perder capacidad de generalizar y/o de describir casos particulares; un modelo general, aplicable a distintos contextos, sacrifica detalles locales y/o pierde la capacidad de hacer predicciones realistas; y un modelo altamente preciso ofrece resultados ajustados, pero limitados a casos muy particulares. Este dilema ha sido retomado y formalizado en la literatura (Matthewson & Weisberg, 2009), donde se plantea como una tensión inherente a la modelación de sistemas complejos. En sociohidrología, esta limitación se refleja en la dificultad de representar la heterogeneidad social y sus retroalimentaciones sin reducir la capacidad predictiva o la transferibilidad de los resultados. Así, la principal fortaleza de los modelos sociohidrológicos es su potencial integrador y explicativo, mientras que su debilidad radica en la incertidumbre y en la complejidad para parametrizar variables sociales. No obstante esta dificultad, se han desarrollado diversas metodologías para representar y simular los sistemas sociohidrológicos. A continuación, se presentan tres enfoques relevantes.

- A. Los modelos basados en agentes (ABM, por sus siglas en inglés) permiten simular las acciones e interacciones de agentes dotados de características, objetivos y comportamientos que modulan su relación con otros agentes y con el entorno. En los modelos sociohidrológicos (SHABM), esta metodología se utiliza para representar cómo las decisiones individuales y colectivas influyen en la dinámica hídrica, generando patrones emergentes a nivel macro (Ohab-Yazdi & Ahmadi, 2018). Pouladi et al. (2019) emplearon un SHABM para analizar cómo factores psicológicos, económicos y ambientales afectan las decisiones de agricultores respecto a la elección de cultivos y estrategias de conservación del agua. Por otra parte, Lillo et al. (2024),

emplean un modelo sociohidrológico basado en agentes para analizar, predecir y gestionar conflictos entre organizaciones de usuarios de agua (OUA), simulando escenarios de oferta hídrica y gobernanza. Ambos trabajos muestran que los ABM son herramientas valiosas para capturar la complejidad de los procesos de decisión y las retroalimentaciones bidireccionales en los sistemas sociohidrológicos.

- B. El análisis de redes sociales (ARS) es una metodología que representa gráficamente la red de conexiones entre individuos u organizaciones, identificando estructuras, patrones de interacción y variables clave. Una red se compone de nodos, a los que se asignan atributos, y de enlaces que representan las relaciones entre ellos. Frota et al. (2021) demostraron que los sistemas sociohidrológicos pueden analizarse como redes causales en las que emergen variables centrales con alta influencia. La metodología combinó aspectos cualitativos y cuantitativos mediante una matriz estructural para identificar factores clave, junto con métodos multicriterio para la construcción de escenarios. El ARS permite, por tanto, detectar propiedades emergentes, visualizar subsistemas y relevar los nodos con mayor centralidad, aportando a la identificación de dinámicas críticas dentro de los SSE.
- C. La simulación de sistemas dinámicos (SD) trabaja con modelos que representan interacciones no lineales y bidireccionales entre variables, utilizando diagramas de stock, flujos y bucles de retroalimentación para describir la evolución del sistema en el tiempo (Hjorth & Bagheri, 2006). Simonovic et al. (1997) ya habían demostrado su potencial para modelar recursos hídricos en contextos de gestión. Más recientemente, Javanbakht-Sheikhahmad et al. (2024) incorporaron al enfoque SD un componente social basado en sostenibilidad económica, agrícola y social. Su modelo permitió identificar retroalimentaciones críticas entre variables sociales e hidrológicas, así como evaluar medidas de gestión, tales como la reutilización de aguas grises o la reducción de fugas. Los resultados evidenciaron que tales medidas no solo ayudan a adaptarse a la escasez, sino que pueden revertir procesos de deterioro hídrico, en línea con lo planteado por Sivapalan (2015) sobre la necesidad de restaurar los ecosistemas en lugar de simplemente adaptarse a su degradación.

3.4 Contexto histórico-normativo del suministro de agua potable rural en Chile

Hasta fines del siglo XX, el acceso al agua potable en Chile se concentró en áreas urbanas. Logrando una cobertura de la red de suministro de agua potable cercana al 99% (SISS, 2022). En contraste solo el 52,8 % de la población rural cuenta con un sistema formal de abastecimiento de agua. El otro 47,8% dependen de camiones aljibe, pozos artesanales o captaciones desde fuentes superficiales, con sistemas de distribución precarios o inexistentes. En estos casos, las familias deben trasladar el agua a pulso desde fuentes lejanas que no cumplen con los estándares mínimos de calidad exigidos por la normativa sanitaria.

Esta brecha responde, en gran medida, a diferencias estructurales e institucionales entre ambos regímenes. En el sector urbano, la producción y distribución del agua potable es prestada por empresas concesionarias sujetas al régimen jurídico de la Ley General de Servicios Sanitarios (MOP, 1989), que fija estándares técnicos, sanitarios y tarifarios, además de obligaciones de continuidad y calidad del servicio, fiscalizadas por el Estado a través de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Dicho modelo, consolidado desde las reformas y procesos de privatización iniciados en la década de 1980, permitió la expansión casi universal del servicio en las ciudades gracias a un marco regulatorio estable, un sistema tarifario de autofinanciamiento y un esquema de subsidios focalizados que aseguraron la sostenibilidad del servicio y la inclusión de los sectores vulnerables.

En contraste, el sector rural quedó históricamente excluido de este marco institucional y la privatización del sistema sanitario durante los años noventa desplazó al Estado de su rol de proveedor directo, al de supervisor, dejando a las zonas rurales sujetas a programas focalizados y dependientes de la autogestión comunitaria (Cariola & Alegría, 2004).

En este escenario, los sistemas de aprovisionamiento de agua potable rural (APR) se consolidaron como estructuras sociales que garantizaron el acceso al agua, en ausencia de una institucionalidad específica. Sin embargo, carecieron de reconocimiento legal, fiscalización y sostenibilidad financiera, lo que generó vulnerabilidad frente a sequías,

conflictos por derechos de aprovechamiento y emergencias sanitarias (Villarroel & Vodanovic, 2011).

El Informe “Estado del Arte y Desafíos en los Servicios Sanitarios Rurales” documentó la diversidad y desigual del desempeño de los sistemas de Agua Potable Rural, constatando diferencias significativas en su capacidad técnica, gestión administrativa y sustentabilidad económica. El estudio evidenció que muchos sistemas operaban con infraestructura obsoleta, recursos limitados y escaso apoyo técnico permanente, lo que afectaba la continuidad y calidad del servicio. Estas conclusiones reforzaron la urgencia de contar con una normativa específica que estableciera responsabilidades claras y mecanismos de fortalecimiento institucional para los prestadores rurales (LAT, 2026).

La Ley N° 20.998, promulgada en 2017 y complementada por el Reglamento D.S. N° 50/2020 del Ministerio de Obras Públicas, constituye el primer cuerpo normativo integral destinado a regular el aprovechamiento de APR, mediante la creación de una nueva figura: Servicios Sanitarios Rurales (SSR) (Blanco & Donoso, 2016). Su promulgación cerró un largo ciclo iniciado con el Programa de APR de 1964, cuando el Estado impulsó la dotación de infraestructura hídrica bajo una lógica subsidiaria, orientada al suministro básico y no al reconocimiento de un derecho exigible (Donoso et al, 2015). Su propósito central es consolidar un marco institucional que garantice la provisión segura, continua y sustentable de agua potable y saneamiento básico en sectores rurales, reconociendo la función social del servicio y la participación activa de las comunidades en su administración.

De acuerdo con el Decreto Supremo N° 174/2024 del Ministerio de Obras Públicas, la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales (SSR), dependiente de la Dirección de Obras Hidráulicas, se organiza a nivel central bajo la dirección de un Subdirector Nacional, encargado de coordinar cuatro departamentos especializados:

- Proyectos Sanitarios, responsable del desarrollo técnico y normativo de los SSR.
- Gestión Comunitaria, orientado al fortalecimiento de las capacidades organizativas y de gobernanza local.

- Procesos de Inversión, encargado de la planificación, evaluación y priorización de las iniciativas de infraestructura.
- Conservación, que supervisa la operación, mantención y sostenibilidad de los sistemas existentes.

Esta estructura se replica a nivel regional mediante Subdirecciones Regionales, dirigidas por Subdirectores Regionales que ejecutan las políticas, programas y proyectos en sus respectivos territorios, asegurando la coordinación entre los niveles central y local. Tal diseño busca garantizar una gestión descentralizada, técnica y participativa, en consonancia con los principios de la Ley N° 20.998, orientada al fortalecimiento de la equidad territorial y la sostenibilidad del servicio (*Figura 1*).

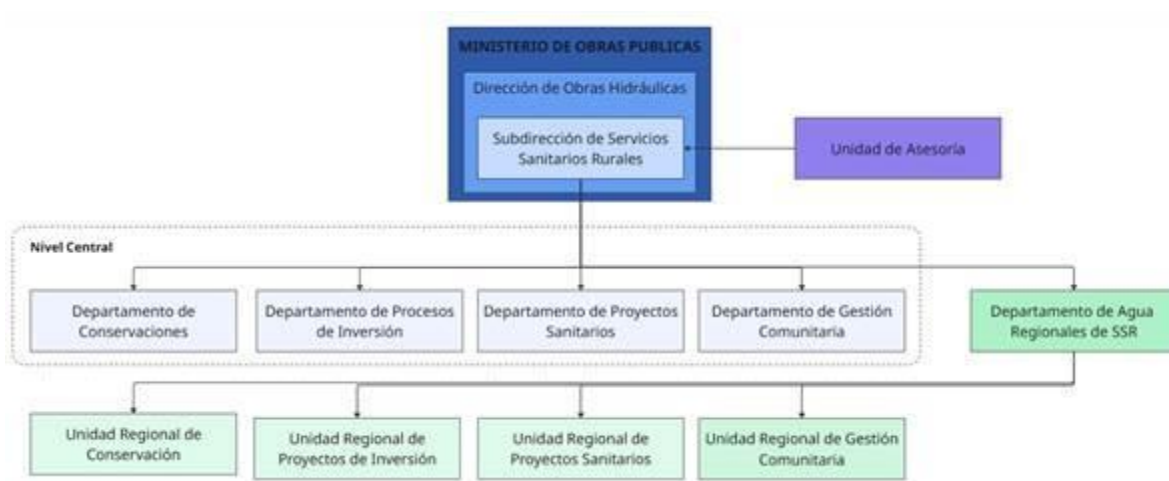


FIGURA 1: ORGANIGRAMA INSTITUCIONAL DE LA SUBDIRECCIÓN DE SERVICIOS SANITARIOS RURALES. Fuente: Elaboración propia a partir del DT N° 174/2024.

La Ley N° 20.998 incorpora instrumentos de gobernanza participativa mediante la creación de los Consejos Consultivos Nacional (CCN) y Regionales (CCR), regulados en su artículo 68. Estos órganos tienen por finalidad asesorar y orientar las políticas públicas en materia de servicios sanitarios rurales, así como aprobar los programas de capacitación y fortalecimiento dirigidos a las organizaciones operadoras.

El Consejo Consultivo Nacional (CCN) integra representantes de organismos públicos, privados y de la sociedad civil, incluyendo delegados electos de comités y cooperativas de

agua potable rural. A su vez, los Consejos Consultivos Regionales (CCR) cumplen una función análoga en los territorios, asesorando al CCN y generando espacios de diálogo entre las instituciones estatales y los prestadores comunitarios. El CCN sesiona al menos dos veces al año, consolidando un canal permanente de coordinación entre los distintos niveles de gobernanza (Figura 2 y Figura 3).



FIGURA 2. ORGANIGRAMA DEL CONSEJO CONSULTIVO NACIONAL.

Fuente: Elaboración propia.

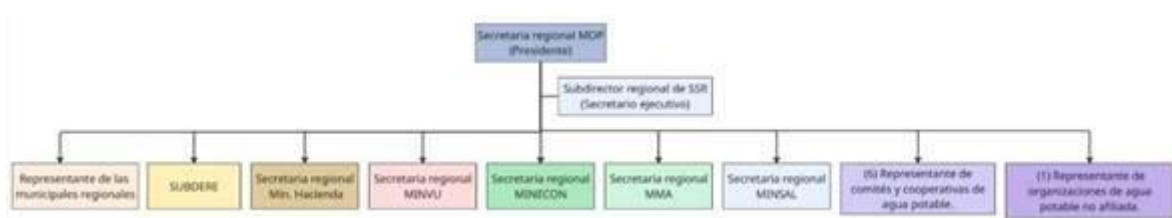


FIGURA 3. ORGANIGRAMA DEL CONSEJO CONSULTIVO REGIONAL.

Fuente: Elaboración propia.

La operación cotidiana de los SSR recae, en la mayoría de los casos, en comités o cooperativas con personalidad jurídica y sin fines de lucro. Ambos modelos comparten un carácter comunitario, pero difieren en su estructura administrativa y capacidad de gestión.

- **Comités de Agua Potable Rural:** se rigen por el D.S. N° 58/1997 sobre “Juntas de Vecinos y demás Organizaciones Comunitarias”. Funcionan como asociaciones voluntarias integradas por socios que eligen democráticamente un presidente, secretario y tesorero, responsables de la administración, cobro de tarifas, mantención del sistema y coordinación con la Subdirección de SSR. Las labores operativas son ejecutadas por personal contratado, que puede pertenecer o no a la comunidad.

- Cooperativas de Servicios Sanitarios Rurales: poseen una estructura jurídica más robusta, con derechos y obligaciones estatutarias definidas. Su gobernanza incluye una asamblea general de socios, un consejo de administración y una gerencia operativa, lo que les permite una gestión más profesionalizada, capacidad de endeudamiento y ejecución de proyectos de mayor escala.

La evidencia reciente muestra que la capacidad organizacional influye directamente en el desempeño del servicio. Según Duarte-Vera et al. (2021), los SSR con mayores niveles de cohesión interna, renovación periódica de sus representantes, redes de colaboración y capacidad de apalancar recursos estatales o privados, presentan mejor desempeño en términos de calidad, cantidad y continuidad del suministro.

Considerando este contexto, la presente tesis trabajó de un instrumento de gestión hídrica basado en el marco conceptual de la sociohidrología, aplicado a un sector rural piloto, la Isla Grande de Chiloé

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

Esta tesis abarcó un área de estudio acotada a las siete comunas de la Isla Grande de Chiloé: Ancud, Quemchi, Dalcahue, Castro, Chonchi, Queilén y Quellón, ordenadas de norte a sur. La Isla Grande de Chiloé presenta una topografía poco accidentada con lomajes suaves y elevaciones que rara vez superan los 800 metros. Numerosos ríos y canales —como el Butalcura y el Canal de Chacao— drenan el territorio hacia el océano Pacífico. En su franja occidental se encuentra la Cordillera de la Costa, también llamada Piuché, que actúa como barrera climática generando zonas de alta pluviosidad en sus alrededores. Muchas zonas costeras e interiores presentan rasgos de paisaje ahogado, producto de la subida del nivel del mar y posibles subsidencias tectónicas (Denton, et al., 1999).

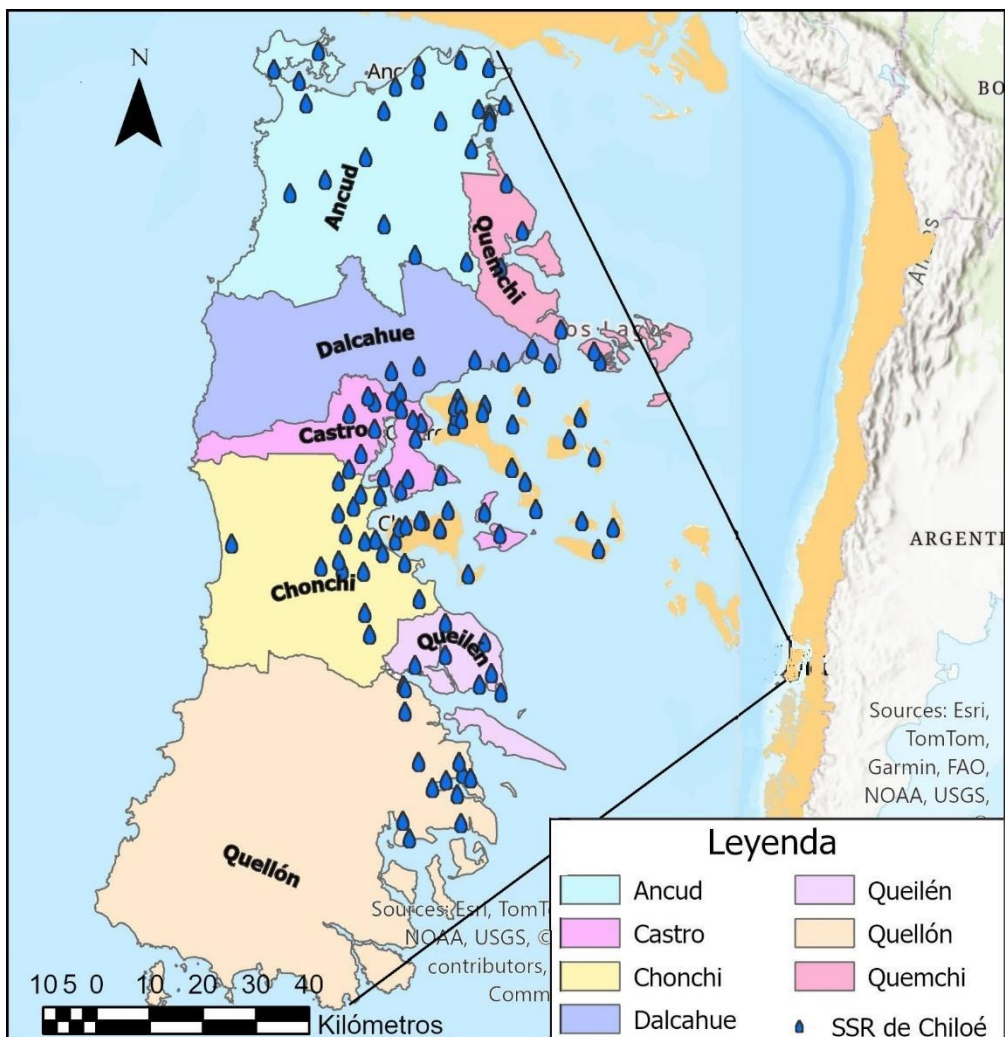



FIGURA 4. CARTOGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO CON DIVISIÓN ADMINISTRATIVA POR COMUNA Y SERVICIOS SANITARIOS RURALES.
 Fuente: Elaboración propia a partir de la información disponible en <https://dga.mop.gob.cl/mapoteca-digital/> a abril de 2025.

La isla presenta un régimen climático templado oceánico, que se caracteriza por temperaturas moderadas con bajas variaciones térmicas a lo largo del año. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 9.6 °C y 13.7 °C, con mínimas promedio entre 4.4 °C y 8.9 °C, y máximas entre 8 °C y 14.7 °C y variaciones moderadas entre el norte, centro y sur de la Isla (Tabla 1). La humedad relativa oscila entre 80.9 % y 86.4 %, lo que contribuye a la persistencia de nubosidad y nieblas, y a la existencia de ecosistemas como los bosques siempreverdes y los humedales. En cuanto a las precipitaciones anuales registradas en las estaciones de Ancud, Chonchi y Quellón estas varían entre 1.312 mm (Ancud) y 1.393 mm

(Chonchi), con una distribución mensual relativamente constante, aunque con máximos en otoño e invierno.

TABLA 1. REGISTRO METEOROLÓGICO DE LOS ÚLTIMOS TRES AÑOS EN ESTACIONES DE ANCUD, CHONCHI Y QUELLÓN.

Comuna	Temperatura °C			Precipitación  acumulada (mm)		Humedad Relativa %
	Media	Mínima	Máxima	Mensual	Anual	
Ancud	[6.2-13.7]	[4.4-8.9]	[8-14.7]	119.8	1312.48	80.9
Chonchi	[9.7-10.8]	[5.8-6.8]	[13.4-14.6]	67.84	1393.6	86.4
Quellón	[9.6-10.2]	[4.9-6.1]	[13.5-13.9]	110.2	1356	85.7

Fuente: Elaboración propia a partir del registro meteorológico disponible en <https://agrometeorologia.cl/>

La particular combinación de factores geográficos y climáticos del territorio insular determina un régimen hídrico marcado por la ausencia de nieve y la alta dependencia de la lluvia, lo que restringe la disponibilidad de agua y condiciona posteriormente el diseño, capacidad y desempeño de la infraestructura hídrica que sostiene a los Sistemas Sanitarios Rurales.

En cuanto a las actividades productivas, destaca la acuicultura en la zona sur de la isla, y la agricultura y ganadería en la zona norte, y en menor medida la silvicultura (Ramírez et al. 2009). A estas actividades productivas, se le suma el aumento de parcelaciones con fines habitacionales post pandemia, fenómeno que ejerce presión sobre los ecosistemas y las fuentes de agua, particularmente en la estación estival. Esta situación ha llevado al Ministerio de Agricultura, a través del SAG, a suspender en 2022 la certificación de subdivisiones que implicarán un cambio en el uso de suelo, posteriormente emitiendo la Resolución Exenta 4.788 en 2024, estableciendo nuevas condiciones para amparar que las subdivisiones mantengan el uso agrícola, ganadero o forestal del suelo, poniendo un alto a múltiples proyectos inmobiliarios en curso.

TABLA 2. REGISTRO CENSAL 2024.

Unidad territorial	Población Censo 2024				
	Total	Hombres	Mujeres	Promedio de edad	Índice de envejecimiento
Ancud	40949	19981	20968	40.5	99.1
Castro	46997	22832	24165	38.0	71.8
Chonchi	16078	7896	8182	39.1	80.1
Dalcahue	14894	7403	7491	37.9	72.3
Queilén	5690	2859	2831	39.9	94.9
Quellón	28460	14339	14121	35.6	46.9
Quemchi	8409	4239	4170	41.8	123.8

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados preliminares del censo 2024, disponibles en: <https://censo2024.ine.gob.cl/resultados/>

Entre 2002 y 2024 la provincia de Chiloé ha experimentado un crecimiento demográfico generalizado, destacando especialmente las comunas de Castro, Ancud y Quellón como los principales centros de concentración poblacional, mientras que las comunas más pequeñas también presentan aumentos sostenidos. Al mismo tiempo, la estructura demográfica es equilibrada en términos de sexo, con una distribución casi igual entre hombres y mujeres, y evidencia un predominio de la población urbana sobre la rural, lo que refleja un proceso de urbanización progresiva en la provincia (*Figura 5 y 6*).

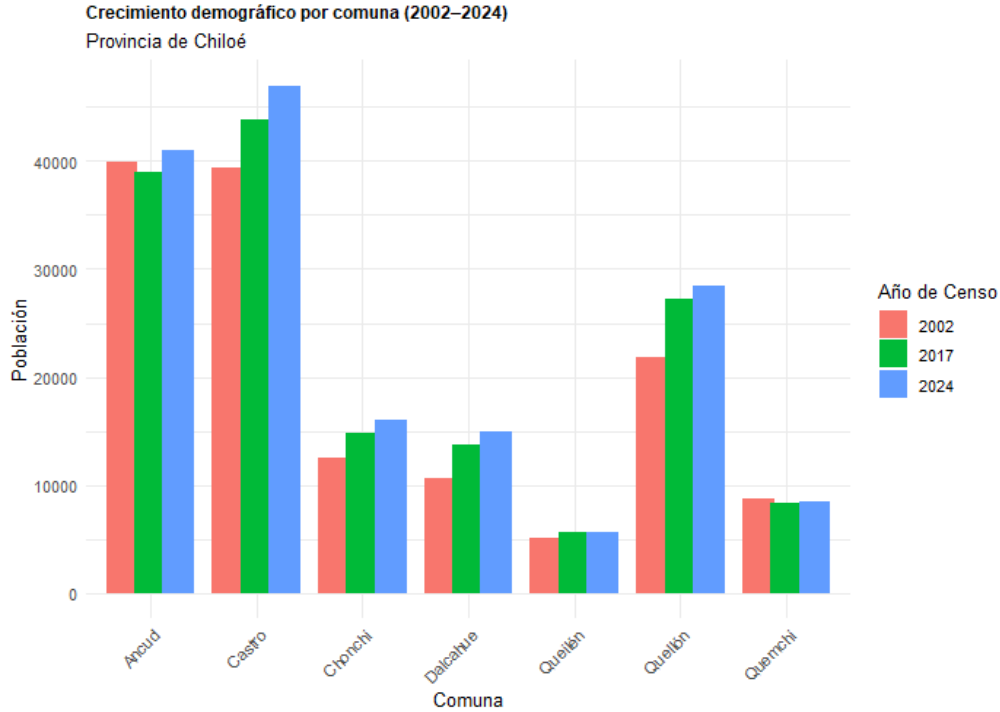


FIGURA 5: CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO EN LAS SIETE COMUNAS DENTRO DE LA ISLA GRANDE DE CHILOÉ (2002–2024). Fuente: elaboración propia a partir de <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/censo-de-poblacion-y-vivienda>

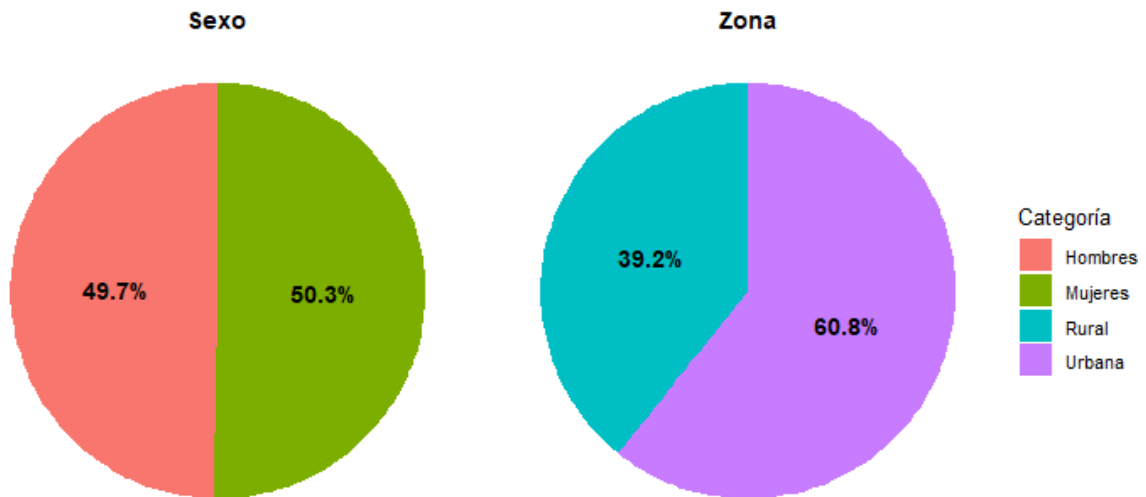


FIGURA 6: DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN DE LA PROVINCIA DE CHILOÉ SEGÚN SEXO Y ZONA DE RESIDENCIA. Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados preliminares del censo 2024, disponibles en: <https://censo2024.ine.gob.cl/resultados/>

Por otra parte, la comuna de Quellón, la más grande de la Isla, cuenta con una proporción considerable de áreas naturales protegidas (Figura 7), como el Parque Tantauco, el cual, junto con ser un atractivo turístico relevante, constituye un área de alto valor ecosistémico. Los bosques y turberas en estas áreas protegidas contribuyen a la regulación del ciclo hidrológico y como tal cumplen el rol de “Infraestructura Ecológica Clave” para la resiliencia climática e hídrica. La infraestructura ecológica se entiende como una “red interconectada de cursos de agua, humedales, bosques, hábitats de vida silvestre y otras áreas naturales, que mantienen los procesos ecológicos naturales, conservan los recursos de agua y aire y contribuyen a la salud y calidad de vida de las comunidades y pueblos” (Benedict y McMahon 2002).

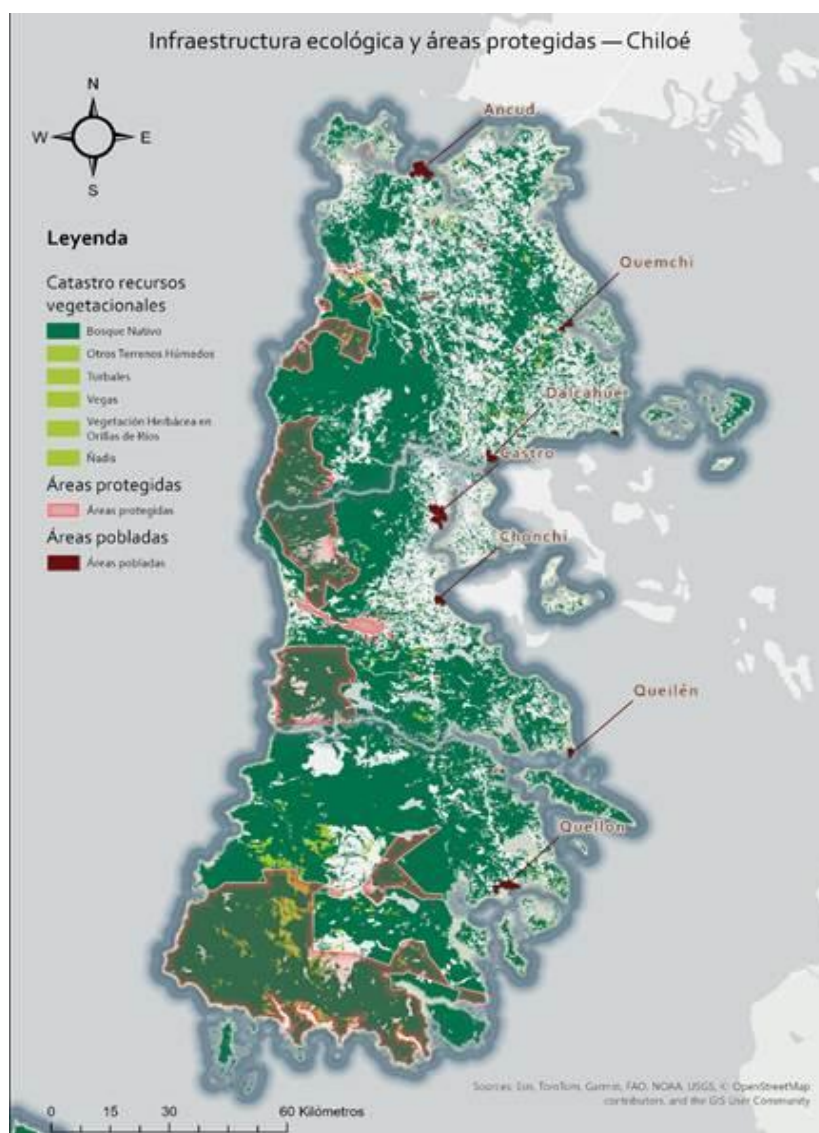


FIGURA 7. COBERTURA DE USO DE SUELO. Fuente: Proyecto BID: Análisis para la aplicación de medidas de Adaptación al Cambio Climático en contexto de sequía en Servicios Sanitarios Rurales en la Isla Grande de Chiloé.

Dentro del área de estudio están inscritos un total de 92 Sistemas Sanitarios Rurales (SSR), donde Ancud y Chonchi presentan la mayor concentración de estos servicios, seguidas por Castro, Quellón y Quinchao. Por otra parte, se observa que los SSR se concentran mayoritariamente en las zonas costeras orientales de la isla de Chiloé, en la orilla que da al mar interior, donde también se encuentra una alta densidad de poblados y establecimientos.

TABLA 3. COBERTURA DE SISTEMA SANITARIOS RURALES POR COMUNA

<i>Comuna</i>	<i>N° de SSR</i>	<i>N° de arranques</i>	<i>Estimación de beneficiarios</i>	<i>% población comunal (censo 2024)</i>
<i>Ancud</i>	23	3.884	10.098	24.66
<i>Castro</i>	16	5.212	13.551	28.83
<i>Chonchi</i>	19	3.645	9.477	58.94
<i>Dalcahue</i>	8	2.257	5.868	39.40
<i>Queilén</i>	7	2.019	5.249	92.26
<i>Quellón</i>	13	2.439	6.341	22.28
<i>Quemchi</i>	6	729	1.895	22.54
Total	92	20185	52481	32.50

Fuente: Elaboración propia a partir de registro de DHO.

4.2. Construcción del modelo socio hidrológico de la Isla Grande de Chiloé.

Para efectos de esta tesis se trabajó con modelos de redes sociales, así como diagramas dinámicos, para generar un diagrama de bucle que representa las interacciones entre los diferentes agentes (sociales y ambientales) que determinan la vulnerabilidad hídrica de los SSR.

La base analítica de este estudio se sustentó en una revisión bibliográfica en torno a la siguiente búsqueda combinada de palabras: “hidrología”, “sociohidrología”, “gestión hídrica”, “gobernanza hídrica”, “Chile”, “Chiloé”, “normativa”, “sistemas de agua potable rural”, “servicios sanitarios rurales”, “cambio climático”, “cobertura de suelo”, “disponibilidad hídrica” y “fenómenos meteorológicos extremos”. Se revisaron 76

documentos, cuya información fue sistematizada en el Anexo N°1: *Matriz de relaciones*. Entre las principales fuentes a consultar destacan:

- Inventarios y bases de datos del Estado: como el Catastro de Recursos Vegetacionales Nativos (CONAF), el Inventario Nacional de Humedales (MMA), la Evaluación de Ecosistemas del Milenio-Chile, y la información hidrológica disponible en la Dirección General de Aguas (DGA).
- Planes de Ordenamiento Territorial y planes estratégicos de adaptación al cambio climático, disponibles en servicios públicos regionales.
- Literatura científica nacional e internacional, incluyendo artículos, tesis y reportes técnicos relacionados con los ecosistemas, recursos hídricos y cambio climático en la región de estudio.
- Informes, reportes y datos censales sobre aspectos sociales, culturales y organizativos que inciden en la gestión del agua por parte de SSR, a través de un análisis de datos secundarios (Censo, CASEN, estudios locales).

La identificación de los componentes y variables claves considera aquellos elementos ecológicos, institucionales y operacionales que influyen en el acceso al recurso hídrico. Posteriormente, el reconocimiento de las interrelaciones entre variables permitió elaborar un diagrama de bucles causales que representa las principales retroalimentaciones y dependencias del sistema (Liu et al., 2015). Para ello se empleó una adaptación de la metodología de análisis de redes sociales descrita por Frota, et al 2021. Obteniendo una matriz de relaciones y diagrama de bucle causal que posteriormente contó con la validación de juicio de tres expertos en materia de: i) regulación y normativa, ii) hidrología y gestión hídrica y iii) socio-ecología. Cada uno evaluó el diagrama de bucle causal en función de la coherencia, consistencia y adecuada representación de los componentes en el sistema descrito. Asimismo, se solicitó a los expertos proponer ajustes o incorporar vínculos omitidos, lo que permitió contrastar el modelo con distintas perspectivas disciplinarias. Las observaciones fueron sistematizadas y comparadas entre sí, integrándose únicamente aquellas convergentes o justificadas técnicamente. Este proceso reforzó la solidez conceptual del modelo y redujo posibles sesgos derivados de la construcción inicial del sistema. A partir de este análisis se resuelve que el mejor modelo relacional se organiza en subsistemas

anidados cuyo objetivo es identificar los factores determinantes en el acceso al agua en servicios sanitarios rurales entendiendo que esto se compone de tres dimensiones: Cantidad, calidad y continuidad de suministro.

4.2.1. Instrumentos de levantamiento de información a partir del modelo.

Para la validación del modelo socio-hidrológico relativo al funcionamiento de los SSR en la Isla Grande de Chiloé, se diseñó una entrevista semiestructurada y una encuesta, que contenían preguntas orientadas a recoger la percepción de los entrevistado respecto de las relaciones capturada en el modelo propuesto. El público objetivo consistió en las directivas de los SSR. Los instrumentos de evaluación del modelo (Anexo N°2: *Entrevista Semiestructurada y encuesta*) abordaron los siguientes ítems:

1. Disponibilidad de agua: percepción de escasez hídrica, demanda y capacidad de respuesta, seguimiento de consumo, fuentes adicionales, amenaza de fuentes, conflictos por uso.
2. Calidad del agua: problemáticas asociadas a la contaminación, potenciales fuentes de contaminación y capacidad para potabilizar el agua.
3. Continuidad del suministro: interrupciones, motivos, uso de camiones aljibe y soluciones implementadas.
4. Aspectos legales/institucionales: conocimiento de la Ley 20.998 y percepción de su impacto.
5. Redes de apoyo y capacidad organizacional: conformación de la directiva, participación de los socios y postulación a proyectos.
6. Capacitaciones y SBN: contenidos capacitaciones actuales, brechas de conocimiento, participación e intereses, percepción del estado del paisaje, cambio climático y conciencia ambiental.

4.2.2. Metodología de terreno y sistematización de base de datos

El levantamiento de la información se realizó en tres campañas de terreno organizadas entre semanas intercaladas durante el 7 de julio y hasta el 8 de agosto. Cada campaña duro cinco días y se entrevistó a un total 15 directivas de SSR. Para llegar a una muestra con un mínimo

de representación de las 92 SSR dentro de la Isla Grande de Chiloé, se complementó con encuestas telefónicas, de aproximadamente 60 minutos de duración, alcanzando un total de 34 observaciones.

Para la evaluación de las relaciones entre factores del modelo socio-hidrológico analizado, se complementaron los resultados obtenidos a partir de las entrevistas y encuestas con antecedentes obtenidos a partir del registro oficial de los SSR de la DOH de la Región de Los Lagos, los registros climáticos e hidrometeorológicos (fuente CR2) y una estimación del cambio de cobertura de suelo en la Isla Grande de Chiloé (Fuente: capa espacial CONAF 2001 a 2021).

Para asegurar la trazabilidad y consistencia metodológica durante el proceso, se generó un diccionario de variables, que detalla el origen del dato, la componente que describe (cantidad, calidad o continuidad del suministro), su naturaleza (si es cualitativo o cuantitativo), su escala (discreta, continua, de razón, categórica), su unidad y procedimientos intermedios de estandarización (Anexo N°3: *Diccionario de variables*). Finalmente se describe la interpretación de la variable y subsistema al que pertenece dentro de modelo. Este diccionario facilitó una estructura que permitió disponer de una base de datos consolidada, transparente y reproducible.

En el caso de variables provenientes de la encuesta, aquellas formuladas en escala Likert de 1 a 7 fueron posteriormente transformadas en categorías generales (frecuentemente alto, medio y bajo) con el objetivo de reducir la dimensionalidad, facilitar la interpretación de patrones y evitar desequilibrios en las distribuciones de las observaciones. Del mismo modo, algunas variables cualitativas provenientes de preguntas de selección múltiple fueron recodificadas en variables dummy, a partir de las cuales se construyeron descriptores cuantitativos obtenidos mediante el conteo de las categorías seleccionadas. Los datos climáticos y de cobertura de uso de suelo, ambos disponibles a escala comunal, fueron asignados a cada servicio según su correspondencia administrativa con la comuna respectiva.

4.3. Análisis exploratorio de datos

Cada una de las variables dependientes fue evaluada de forma separada. Primero se realizó un análisis exploratorio de datos (AED) considerando todas las variables predictoras con el objetivo de verificar coherencia del modelo en función de cada variable dependiente, reduciendo el número de variables priorizando únicamente aquellas que aportan mayor información al modelo (Tabla 4).

TABLA 4. SÍNTESIS DE ANÁLISIS REALIZADOS DE ACUERDO AL TIPO DE VARIABLE DEPENDIENTE.

Variable dependiente	Tipo	ANÁLISIS
Problemas de calidad (problemcalidad)	Categórica ordinal (baja–media–alta).	EDA: Estadística descriptiva, Pruebas no paramétricas (<i>Kruskal-Wallis</i> , <i>chi-cuadrado (Fisher)</i> , <i>SMD</i>).
Interrupción (pinterrupcion)	Categórica ordinal (baja–media–alta).	EDA: Estadística descriptiva, Pruebas no paramétricas (<i>Kruskal-Wallis</i> , <i>chi-cuadrado (Fisher)</i> , <i>SMD</i>).
Agua Producida (aguaproducida)	Numérica continua (m ³ /mes).	EDA: Estadística descriptiva, Correlaciones, ANOVA/Kruskal-Wallis, PCA.

* En todos los análisis, los procedimientos aplicados respondieron estrictamente a la naturaleza de las variables.

Cuando la variable dependiente correspondió a una medida continua, como agua producida, el AED incluyó el cálculo de estadísticos descriptivos para las variables numéricas (n, media, desviación estándar, rangos, asimetría y curtosis), la estimación de correlaciones de Spearman entre predictores cuantitativos y entre estos y la variable dependiente, además de la identificación de asociaciones estadísticamente significativas mediante pruebas correlacionales con ajuste por comparaciones múltiples. Asimismo, se aplicó un análisis de

componentes principales (PCA) para representar la estructura de variación entre predictores numéricos e identificar conjuntos de variables con patrones comunes.

Para los predictores categóricos, el AED consideró la descripción de sus distribuciones mediante tablas de frecuencia y proporciones, seguida de la evaluación de su relación con la variable dependiente categórica, mediante pruebas de Kruskal–Wallis y diferencias de medias estandarizadas (SMD) entre niveles de cada predictor categórico, permitiendo cuantificar la magnitud de las diferencias entre grupos (baja–media, baja–alta y media–alta). Este procedimiento permitió identificar diferencias estadísticamente significativas entre las categorías de la variable dependiente, complementándose con la estimación del tamaño del efecto, para determinar la relevancia de dichas diferencias. Adicionalmente, se aplicaron pruebas de chi-cuadrado entre pares de predictores categóricos, para descartar relaciones estructurales debido a asociaciones internas entre estos, que pudieran distorsionar la interpretación conjunta de los resultados.

Finalmente, la exploración se complementó con visualizaciones de boxplots para variables categóricas, matrices de correlación para variables numéricas y gráficos derivados del análisis de PCA. Los códigos utilizados para ejecutar estos análisis se encuentran disponibles en el Anexo N°4: *códigos*.

4.4. Modelos de regresión lineal múltiple

El procedimiento de selección de variables se aplicó de forma independiente para cada variable dependiente; producción de agua, calidad del suministro y continuidad del suministro, sobre la base de los conjuntos de variables explicativas previamente definidos, se generaron de manera exhaustiva todas las combinaciones posibles de dos y tres variables explicativas. Para cada combinación se estimaron modelos de regresión lineal múltiple, los cuales fueron evaluados mediante criterios estadísticos de ajuste y parsimonia, permitiendo identificar las combinaciones con mejor desempeño explicativo para cada variable dependiente. Cada modelo fue evaluado mediante:

- **Criterio de Información de Akaike (AIC)**, como medida de ajuste penalizada por complejidad del modelo.

- **Coefficiente de determinación (R^2)**, como indicador de la proporción de variabilidad explicada.

La decisión metodológica de realizar un análisis acotado a dos y tres variables, del conjunto de predictores, se justifica por el número de observaciones reducido. Ya que, la inclusión simultánea de un gran número de variables en modelos multivariados complejos (por ejemplo, GLM con múltiples predictores, modelos penalizados o algoritmos de aprendizaje automático como random forest) aumenta significativamente el riesgo de sobreajuste, lo que produce estimaciones inestables, alta varianza y una capacidad predictiva poco generalizable. Frente a esta limitación estructural, evaluar todas las combinaciones posibles de pares o tríos de predictores permite reducir drásticamente la dimensionalidad del problema y obtener modelos más parsimoniosos, interpretables y estadísticamente robustos.

Adicionalmente, el análisis trivializado permitió evaluar si la incorporación de una tercera variable mejoraba significativamente la capacidad explicativa del modelo, manteniendo un equilibrio entre ajuste y parsimonia

5. RESULTADOS

5.1. Modelo Socio-hidrológico jerárquico para Isla Grande de Chiloé

El modelo socio-hidrológico para la Isla Grande de Chiloé que se propuso presenta una estructura anidada de subsistemas y variables interrelacionadas, que modulan el suministro de agua en función de tres dimensiones: cantidad y calidad del agua, y continuidad del suministro. Se identifican dos subsistemas principales que actúan de manera conjunta (Figura 8).

El primer subsistema, “*Servicio ecosistémicos de aprovisionamiento de agua*” que describe el ciclo hidrológico y sus elementos básicos (precipitación, infiltración, recarga de acuíferos, escorrentía, evaporación, evapotranspiración y almacenamiento superficial y subterráneo), representa el nivel jerárquico superior, más externo; que regulan la generación, disponibilidad y renovación del recurso hídrico.

A su vez, la dinámica del ciclo hidrológico está fuertemente influido por la cobertura y uso del suelo (bosques, pomponales, praderas, y áreas urbanizadas, entre otros), por procesos de erosión y degradación, y por fenómenos climáticos como el aumento de temperatura, alteraciones en la humedad relativa o sequías persistentes. La interacción de estos factores influye directamente en la capacidad del territorio para captar, almacenar y liberar agua, determinando tanto el volumen disponible como la estabilidad de las fuentes naturales que abastecen a los SSR de la Isla Grande de Chiloé.

El segundo subsistema, jerárquicamente hablando, corresponde a la dimensión *Sociodemográfica*, que opera en dos escalas interdependientes. A nivel nacional, la *Regulación y gestión institucional* establece derechos, obligaciones, estándares y restricciones que enmarcan el funcionamiento de los SSR. Mientras que, a un nivel hiper-local, la aplicación de esta normativa (o no aplicación) se ve reflejada en la *gestión de los SSR*, la cual se puede describir en función de la condición de sus infraestructuras y las capacidades administrativas y logísticas instaladas, el compromiso de la comunidad, la disponibilidad de financiamiento, y la existencia de redes de apoyo externas, entre otros.

Ambos sistemas (el ciclo hidrológico y el sociodemográfico) se integran en un esquema donde las fuentes naturales determinan la disponibilidad física del recurso, mientras que las capacidades institucionales y organizacionales determinan cómo ese recurso se transforma en acceso efectivo al agua potable (cantidad y calidad del agua, así como la continuidad del suministro). Así, el modelo evidencia que el acceso no depende únicamente de factores hidrológicos, sino de la interacción entre condiciones ecológicas, regulación, financiamiento, infraestructura y gestión comunitaria.

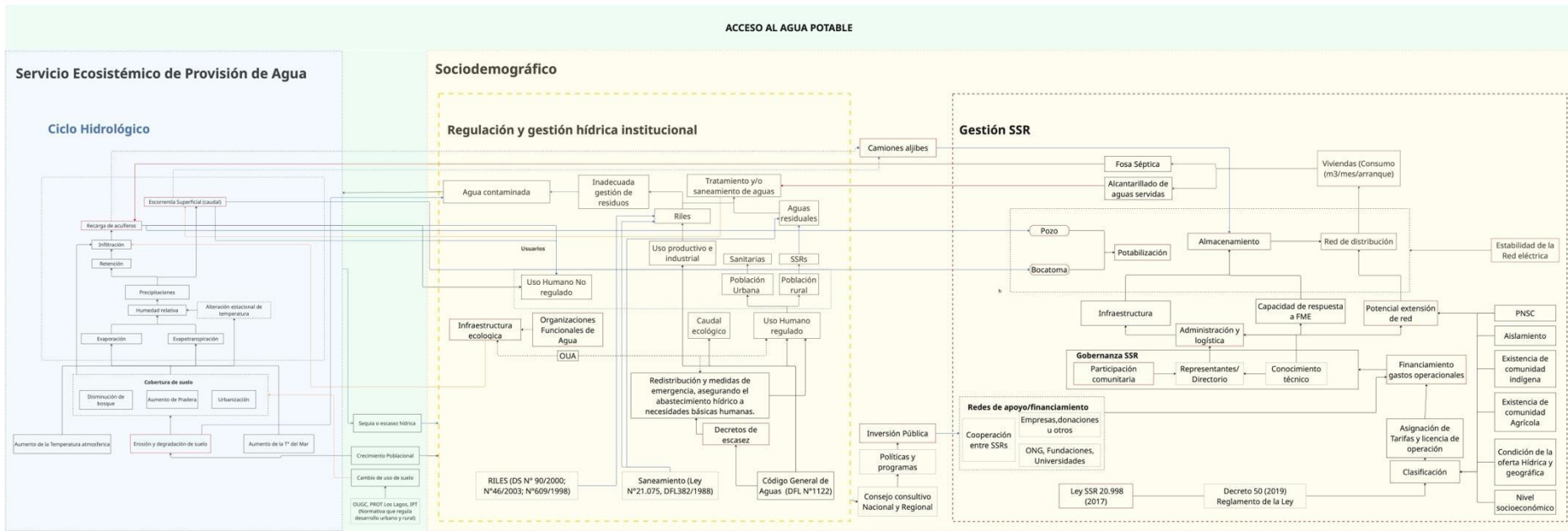


FIGURA 8. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL MODELO SOCIO-HIDROLÓGICO CON ESTRUCTURA JERÁRQUICA

En total se caracterizaron 43 variables predictoras, que describen de manera multidimensional las condiciones ecológicas, institucionales, operacionales y socio-organizativas que intervienen en el acceso al agua. El análisis se estructura a partir de tres variables dependientes: i) agua producida, ii) ocurrencia de problemas de calidad y iii) ocurrencia de interrupciones del suministro, las cuales permiten evaluar cómo los factores climáticos/ecológicos y sociales/institucionales condicionan el acceso efectivo al servicio. Las observaciones incluyen atributos operacionales (arranques, antigüedad, agua producida, uso y fuentes adicionales), percepciones de los comités (escasez hídrica, participación, impacto de la ley N° 20.998 y su conocimiento, frecuencia de problemas de calidad e interrupción de suministro), prácticas organizacionales (monitoreo, saneamiento, potabilización, capacitaciones) y variables asociadas al estado del paisaje y del clima (precipitaciones, humedad, temperaturas, cobertura de suelo). En la *Figura 9* se presenta la distribución espacial de los 34 SSR analizados en esta tesis, los que se encuentran distribuidos en las comunas de Ancud, Dalcahue, Castro, Quellón, Queilen y Quemchi.

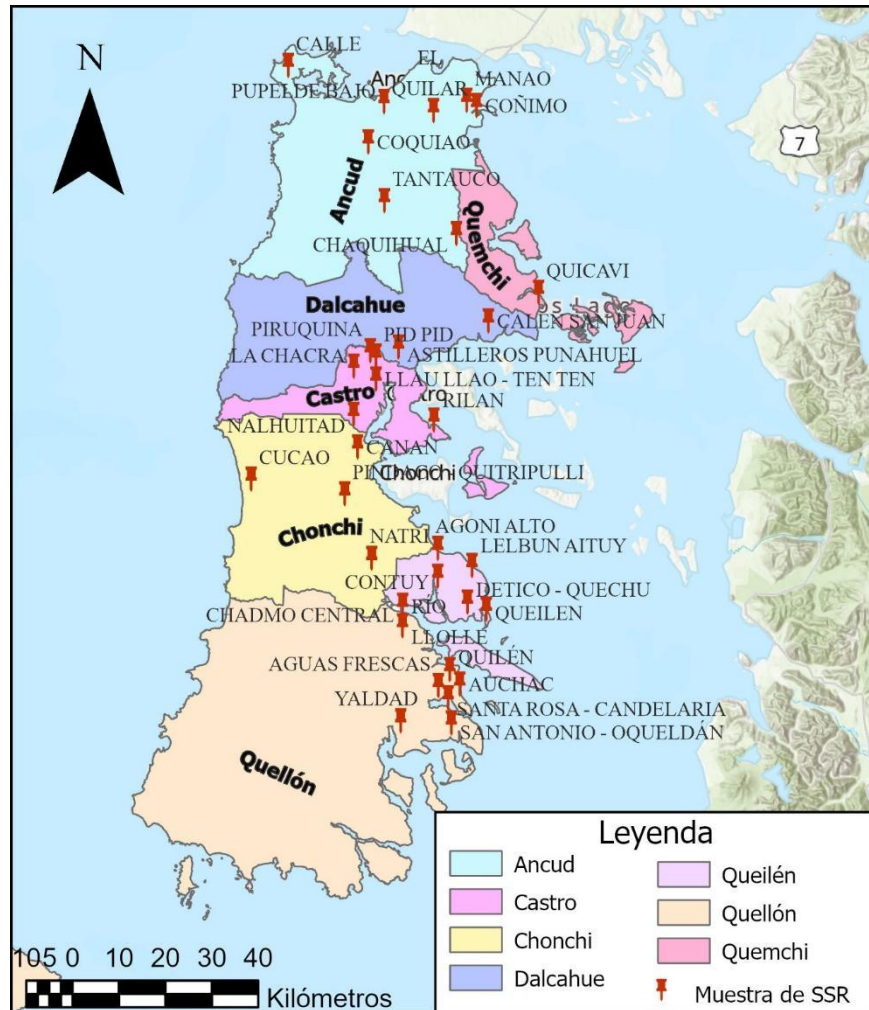


FIGURA 9. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE SSR MUESTREADAS.

5.2. Análisis exploratorio de datos

5.2.1 Cantidad: Agua Producida

El análisis de la producción de agua (m^3/mes) se realizó considerando 32 variables predictoras. De estas variables, 21 corresponden a predictores numéricos continuos, incluyendo indicadores climáticos, variables de demanda como cobertura, demanda estival, competencia por el recurso; otras operacionales como capacidad financiera, número de tecnologías y fuentes adicionales, así como variables de cobertura de suelo. Las 11 variables restantes son de tipo categórico, asociadas principalmente a condiciones de operación, gestión, percepción institucional y estado de la infraestructura. Sobre esta base, a continuación, se presentan los principales resultados del análisis exploratorio y comparativo de la producción de agua.

Como se observa en la *Figura 10* la producción de agua varía significativamente entre las distintas categorías de las variables cualitativas. En particular, se observa una media superior de agua producción de agua en SSR con una “muy buena” condición de la infraestructura, presentan unas medianas superiores de producción de agua en contraste con el resto de las categorías. La frecuencia media de camiones aljibe también coincide con una mayor capacidad de producir agua.

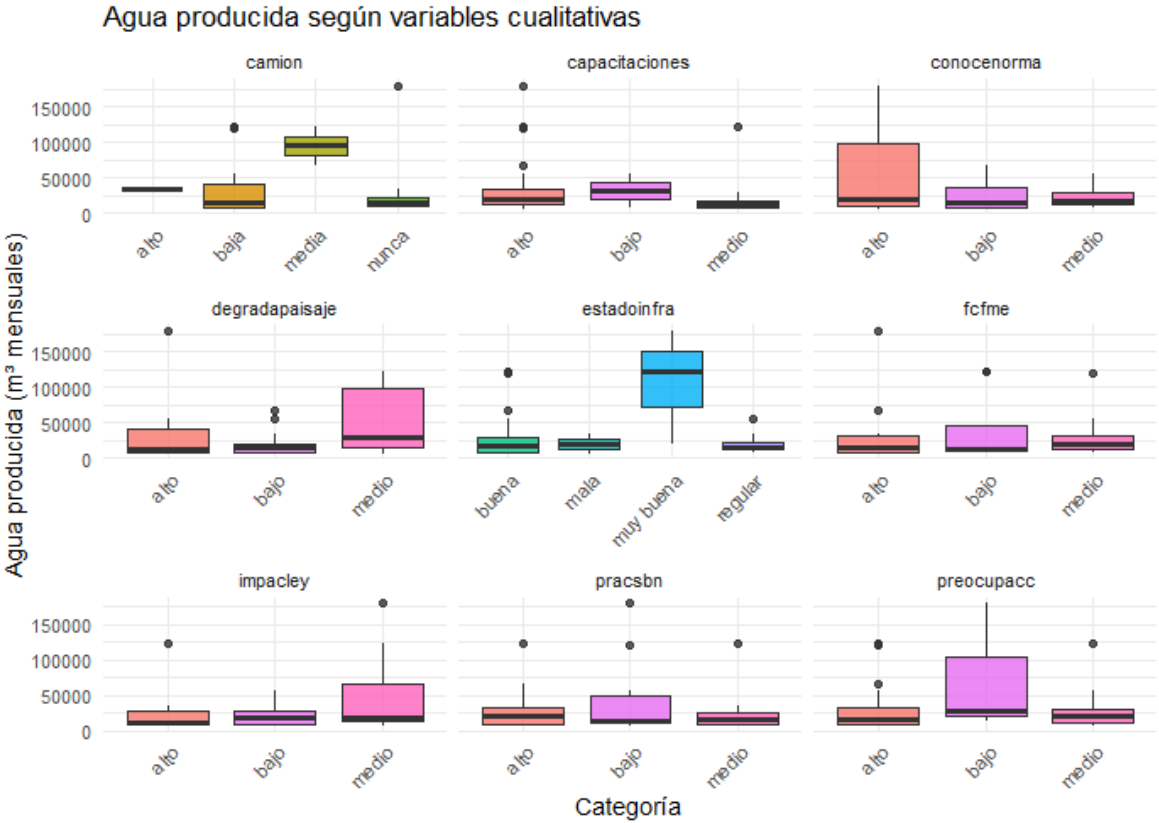


FIGURA 10. RELACIÓN ENTRE VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA Y DISTRIBUCIÓN DE RESPUESTAS POR CATEGORÍAS DE VARIABLES CATEGÓRICAS. *Camión*: frecuencia camión aljibe; *capacitaciones*: percepción de capacitaciones; *conocenorma*: nivel de conocimiento de la normativa; *degradapaisaje*: percepción de la degradación de paisaje en el entorno cercano al SSR; *estadoinfra*= percepción del estado de la infraestructura; *fcfme*: frecuencia de cortes por FEM; *impacley*: percepción del impacto de la ley n° 20.998; *pracsbn*: percepción frecuencia de desarrollo de prácticas

de soluciones basadas en la naturaleza y *preocupacc*: percepción de la preocupación por el cambio climático.

La prueba de Kruskal–Wallis se aplicó para evaluar si la producción de agua presentaba diferencias significativas según las categorías de las distintas variables cualitativas del estudio. Los resultados muestran que ninguna de las doce variables evaluadas presenta diferencias estadísticamente significativas entre grupos.

TABLA 5. RESULTADO DE LA PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE VARIABLES CUALITATIVA

Variable	H_kw	P_kw	p_adj	epsilon2
Frecuencia de camión aljibes	5.18	0.159	0.735	0.157
Estado de la infraestructura	4.72	0.194	0.735	0.143
Percepción de la degradación de paisaje	2.81	0.245	0.735	0.0852
Percepción de capacitaciones	3.38	0.184	0.735	0.103
Percepción de escasez	1.02	0.313	0.745	0.0309
Disminución de fuente de agua	0.477	0.490	0.745	0.0145
Preocupación por cambio climático	1.40	0.496	0.745	0.0424
percepción del impacto de la ley	1.53	0.466	0.745	0.0463
Fuente de captación de agua	0.809	0.667	0.858	0.0245
Frecuencia de cortes por FME	0.481	0.786	0.858	0.0146
Conocimiento de la norma	0.638	0.727	0.858	0.0193
Practica de soluciones basadas en la naturaleza	0.144	0.930	0.930	0.00437

Los estadísticos H obtenidos fueron bajos en todos los casos (H entre 0.14 y 5.18), y los valores p ajustados ($p_{adj} \geq 0.735$) confirman que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad de distribuciones. Esto indica que variables como tipo de fuente, estado de la infraestructura, percepción de escasez, prácticas SBN, percepción de capacitaciones, preocupación comunitaria, impacto de la ley u otras dimensiones sociales e institucionales no presentan un efecto significativo sobre el volumen de agua producida en las 34 SSR caracterizadas en esta tesis.

Por otro lado, la *Figura 11* evidencia una relación positiva entre el agua producida (m³/mes) y las variables cualitativas descriptivas de la demanda (cobertura y demanda estival). Esta tendencia se intensifica en valores altos de ambas variables, donde además se observa un

aumento en la dispersión de los datos, indicando una mayor heterogeneidad entre sistemas de alta demanda lo que sugiere mayores niveles de se asocian con incrementos en la producción de agua. En concordancia con estos patrones visuales, el análisis de correlación muestra que la cobertura, definida en función del número de arranques por SSR, presenta la correlación positiva más alta con la producción de agua ($\rho = 0.572$), lo que indica que los sistemas con mayor área de cobertura territorial tienden a producir mayores volúmenes. De forma consistente, la demanda estival, definida en base al aumento poblacional periódico, exhibe una correlación positiva moderada ($\rho = 0.487$), sugiriendo que los aumentos estacionales en la demanda ejercen una presión operativa que se traduce en una mayor producción de agua durante dicho período.

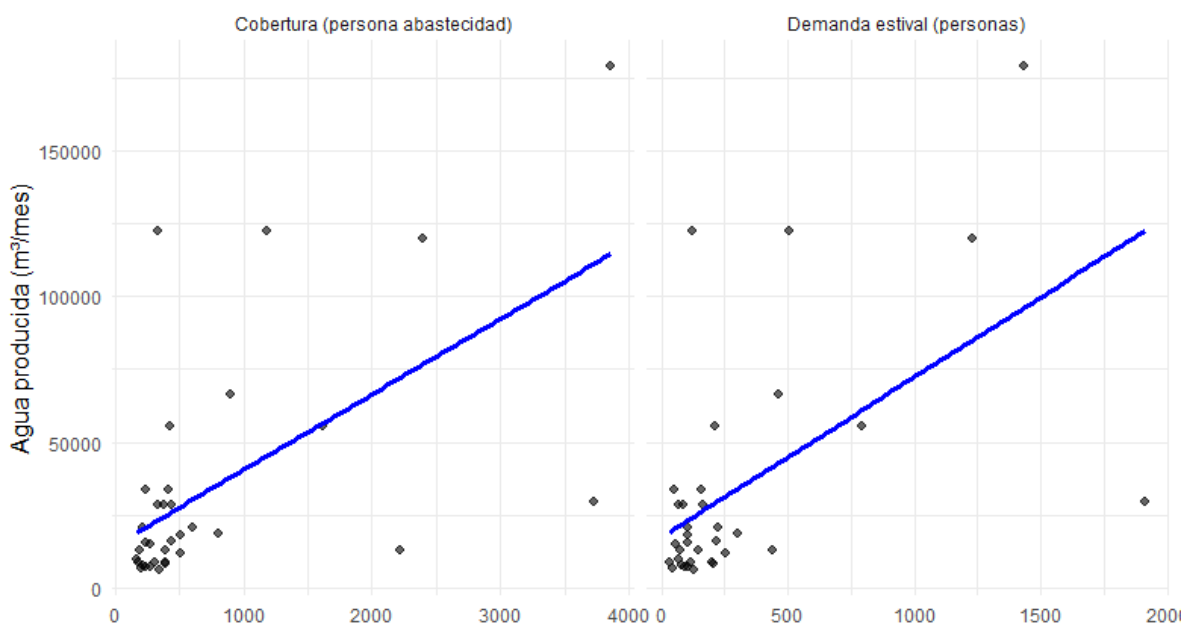


FIGURA 11: RELACIÓN ENTRE AGUA PRODUCIDA VERSUS DEMANDA DEL SISTEMA.

En las *Figuras 12 y 13* no se observa una relación clara entre la producción de agua y las variables meteorológicas analizadas, mientras que las variables asociadas a la cobertura vegetaciones presentan una alta dispersión de los volúmenes producidos para valores similares. No obstante, se distinguen algunos patrones relevantes: la deforestación muestra una tendencia levemente positiva con el agua producida, mientras que la pérdida de turberas exhibe una tendencia negativa, sugiriendo menores volúmenes de producción en sistemas con mayor degradación de estos ecosistemas. Este patrón es respaldado por, el análisis de

correlación que muestra el porcentaje de *pérdida de turberas* presenta una relación negativa moderada con la producción de agua ($\rho = -0.537$), lo que sugiere que la degradación de ecosistemas naturales se asocia con una menor capacidad de producción hídrica. De forma complementaria, el *porcentaje de superficie impermeable* también muestra una correlación negativa, aunque de menor magnitud ($\rho = -0.393$), reforzando la hipótesis de que los procesos de degradación ambiental influyen negativamente en la disponibilidad de agua (Figura 15).

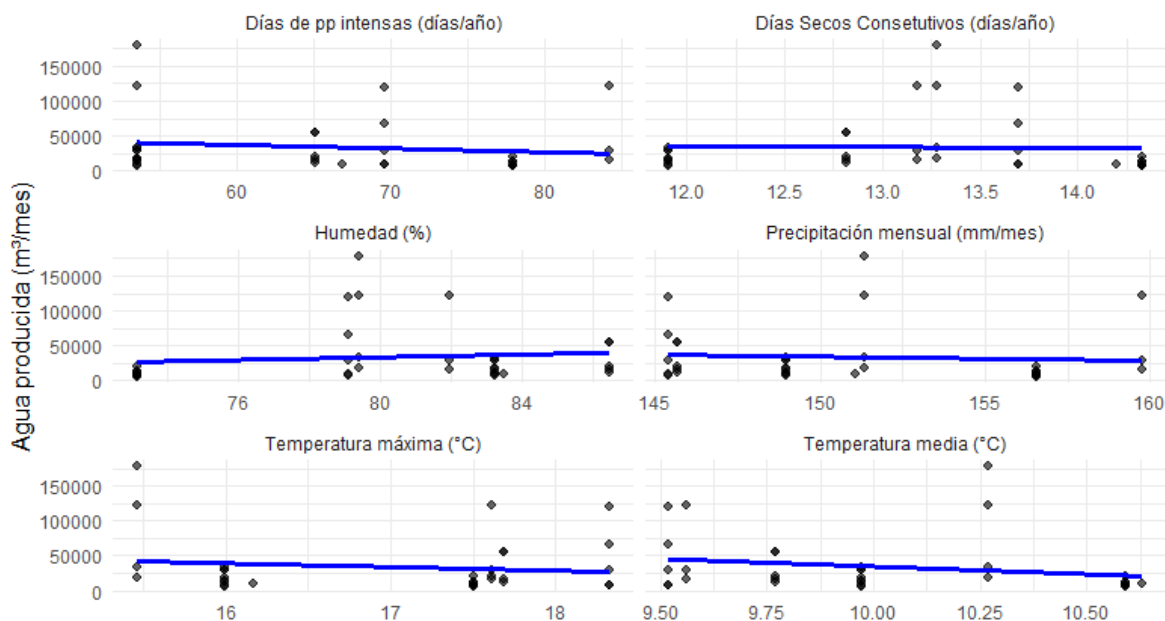


FIGURA 12: RELACIÓN ENTRE AGUA PRODUCIDA Y VARIABLES CLIMÁTICAS E HIDROMETEOROLÓGICAS.

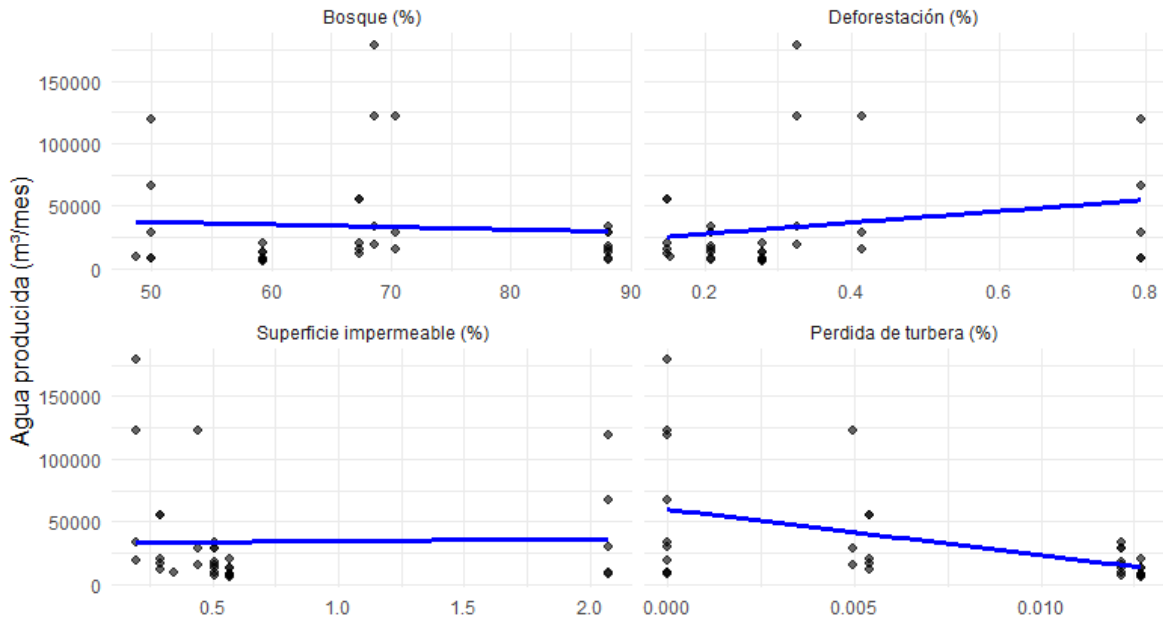


FIGURA 13: RELACIÓN ENTRE AGUA PRODUCIDA Y VARIABLES DE COBERTURA DEL SUELO.

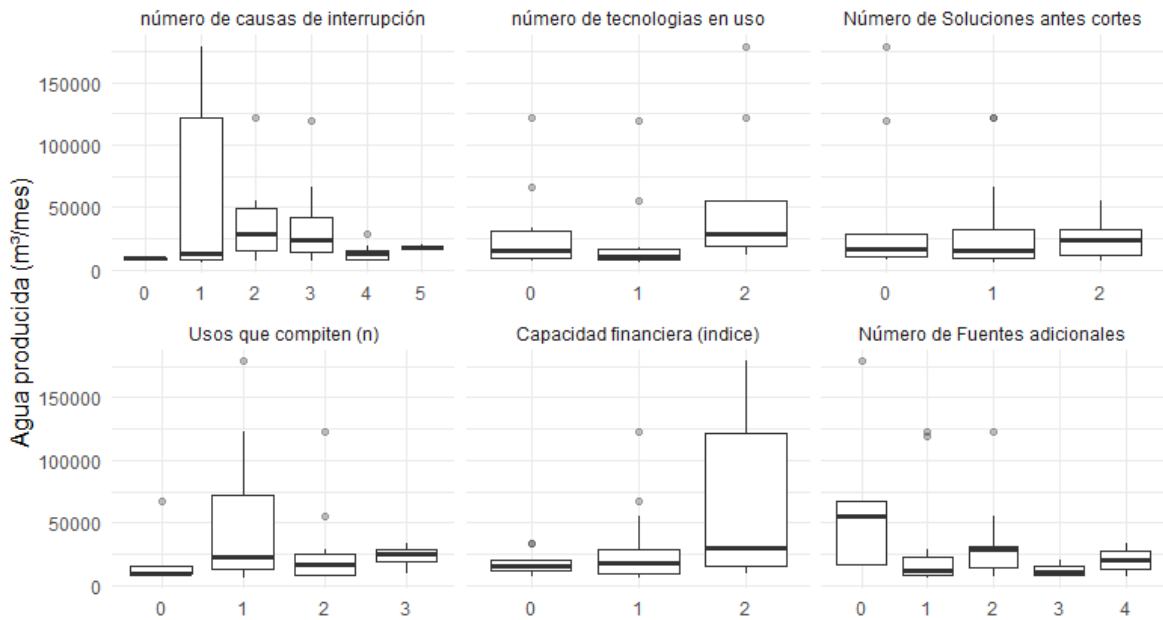


FIGURA 14: AGUA PRODUCIDA Y FACTORES DE GESTIÓN DEL SISTEMA.

Por otra parte, el diagrama de caja que relaciona la producción de agua con variables de gestión muestra una alta variabilidad intra-grupo, especialmente en causas de interrupciones (1) y capacidad financiera (2). Algunos sistemas con mayor número de fuentes adicionales o mayor capacidad financiera alcanzan valores más altos de producción, aunque también se

presentan valores atípicos. En general, estas variables parecen asociarse más a la variabilidad de la producción que a un patrón lineal simple (Figura 14).

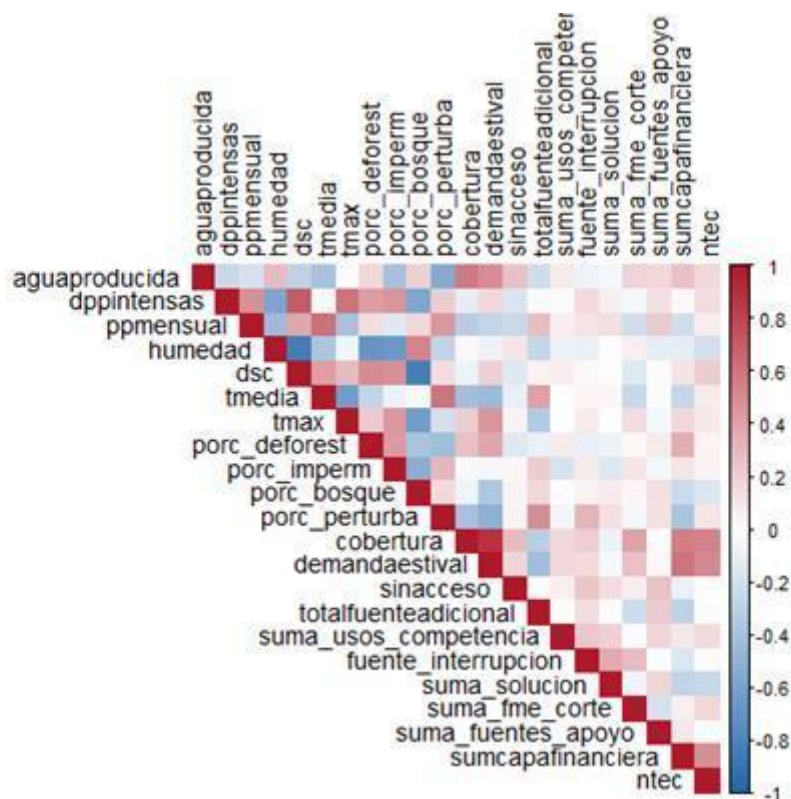


FIGURA 15. ESTRUCTURA DE CORRELACIONES ENTRE VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA Y VARIABLES CONTINUAS. *dppintensas*: días de precipitaciones intensas; *ppmensual*: precipitaciones media mensual; *humedad*: humedad relativa; *dsc*: días secos consecutivos; *tmedia*: temperatura media; *tmax*: temperatura máxima; *cobertura*: personas beneficiadas; *porc_imperm*: % de impermeabilidad; *sinacceso*: personas sin acceso; *demandaestival*: demanda estival; *porc_bosque*: % de bosque; *porc_perturba*: % de pérdida de turbera; *porc_deforest*: % de deforestación; *suma_usos_competencia*: usos que compiten ; *fuentes_interrupcion*: fuentes de interrupción; *suma_solucion*: suma de soluciones ante cortes de suministro; *suma_fme_corte*: suma FME que genera cortes; *suma_fuentes_apoyo*: suma de fuentes de apoyo; *sumcapafinanciera*: capacidad financiera; ntec: numero de tecnologías; *totalfuenteadicional*: total de fuentes adicionales.

Específicamente, el análisis de correlación mostró un conjunto acotado de variables con una asociación estadísticamente significativa con el volumen de agua producida. Las cinco variables que presentan mayor grado de correlación con el volumen de agua producida se encuentran en la *Tabla 6*. En general, el resto de los predictores presenta correlaciones bajas

($|\rho| < 0.30$) y no significativas, lo que indica ausencia de relaciones lineales fuertes con la variable dependiente.

TABLA 6. VARIABLES CON MAYOR CORRELACIÓN ENTRE PREDICTORES NUMÉRICOS Y EL VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA, APLICANDO CORRELACIÓN DE SPEARMAN

Variable predictora	Rho	P	p_adj
Cobertura N° de arranques	0.572	0.0004**	0.0085**
% de perturbación	-0.537	0.0011**	0.0111**
Demanda estival	0.487	0.0035**	0.0242**
Temperatura media [♦]	-0.390	0.0227	0.0952
% de impermeabilización [♦]	-0.393	0.0215	0.0952

♦ La temperatura media ($\rho = -0.390$) y el porcentaje de impermeabilidad ($\rho = -0.393$) mostraron correlaciones moderadas antes del ajuste, pero perdieron significancia estadística una vez corregido el error tipo I.

Respecto del análisis de componentes principales, los dos primeros componentes concentran una proporción importante de la variabilidad explicada: PC1 explica el 24.3 % y PC2 un 19.4 %, acumulando 43.6 %, y sumando PC3 (10.7%) y PC4 (8.1%) se alcanza un 62.5 % de varianza explicada.

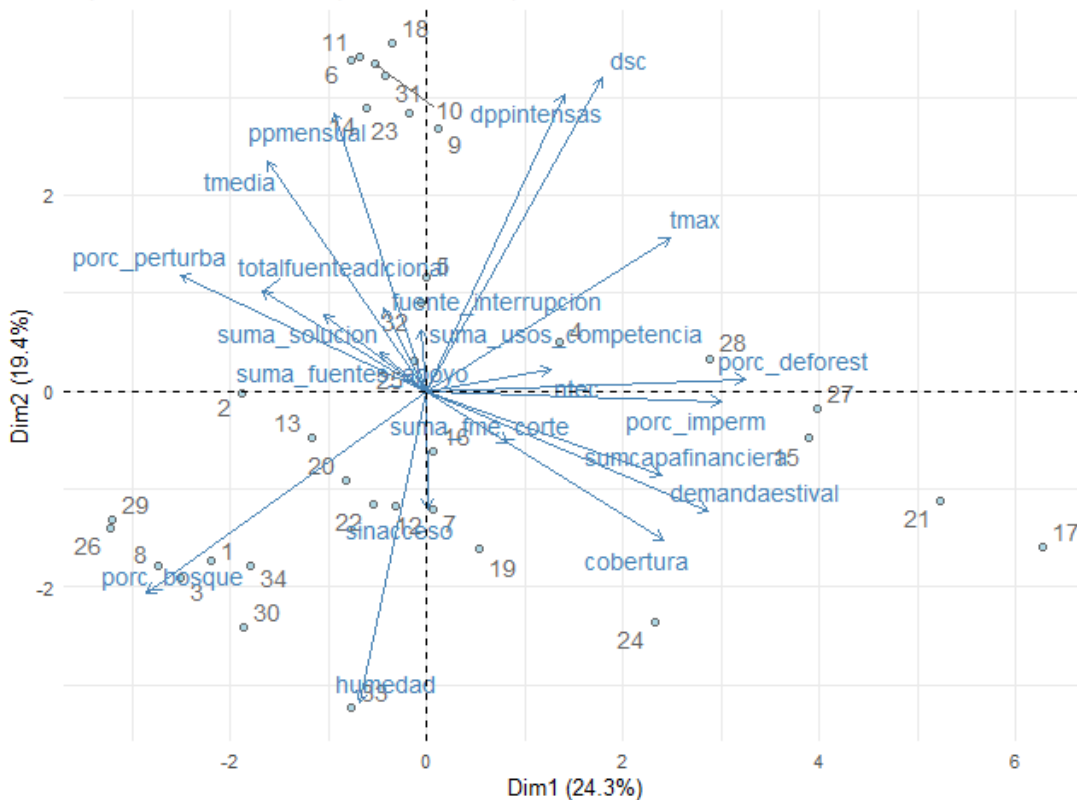


FIGURA 16: ESTRUCTURA MULTIVARIADA DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA Y SUS DETERMINANTES MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. *dppintensas*: días de precipitaciones intensas; *ppmensual*: precipitaciones medias mensuales; *humedad*: humedad relativa; *dsc*: días secos consecutivos, *tmedia*: temperatura media; *tmax*: temperatura máxima, *cobertura*: personas beneficiadas, *porc_imperm*: % de impermeabilidad; *sinacceso*: personas sin acceso; *demandaestival*: demanda estival de la demanda; *porc_bosque*: % de bosque; *porc_perturba*: % de pérdida de turbera, *porc_deforest*: % de deforestación, *suma_usos_competencia*: Suma de usos que compiten; *fuentes_interrupcion*: fuentes de interrupción; *suma_solucion*: Suma de soluciones ante cortes de suministro; *suma_fme_corte*: suma de cortes por FME, *suma_fuentes_apoyo*: suma de fuentes de apoyo; *sumcapafinanciera*: capacidad financiera, *ntec*: número de tecnologías y *totalfuenteadicional*: Total de fuentes adicionales.

La dimensión 1 (PC1) está dominada por variables asociadas a los procesos de transformación del territorio, seguidos por descriptores de la demanda y climáticos. Destaca la contribución positiva del porcentaje de deforestación e impermeable, demanda estival y temperatura máxima. En contraste, variables relacionadas con la cobertura vegetal, pérdida de turbera y uso de fuentes adicionales presentan cargas negativas, sugiriendo un gradiente que opone sistemas de mayor presión antrópica y demanda hídrica frente a aquellos con mayor cobertura natural u operacional (Figura 16 y 17A)

En contraste, la Dimensión 2 (PC2) captura principalmente un gradiente asociado a variables climáticas y de disponibilidad hídrica, con altas contribuciones positivas de la duración de sequías, precipitaciones intensas, precipitación mensual y temperatura media. En sentido opuesto, variables como la humedad, cobertura del sistema y demanda estival presentan cargas negativas, lo que sugiere que este eje discrimina entre condiciones climáticas más extremas y sistemas con mayor estabilidad hídrica y cobertura operativa (*Figura 16 y 17B*).

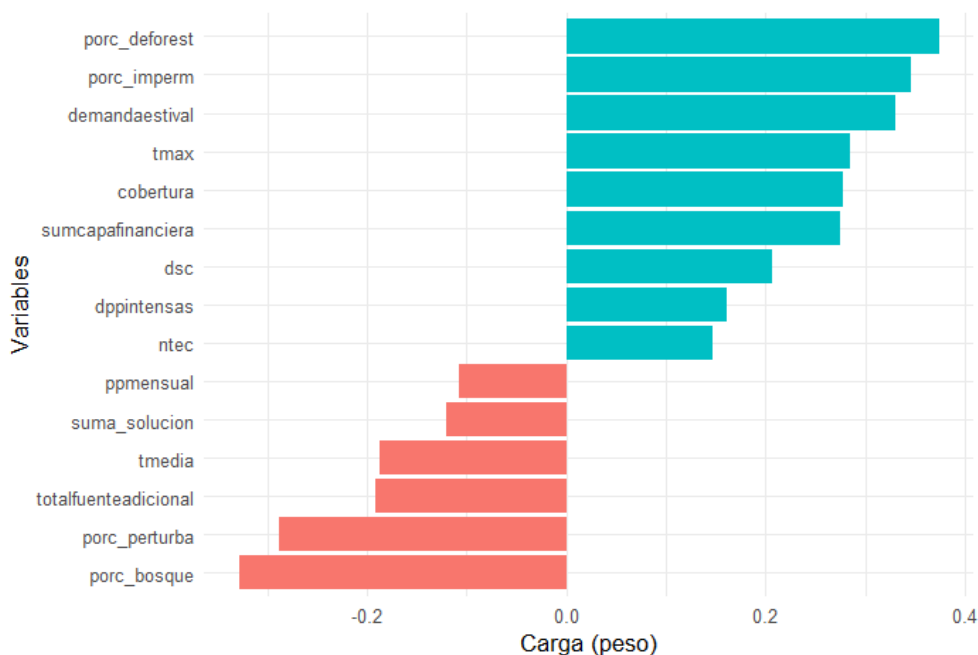


FIGURA 17A: CONTRIBUCIÓN DE VARIABLES A LA DIMENSIÓN 1 (PC1)

dppintensas: días de precipitaciones intensas; *ppmensual*: precipitaciones medias mensuales; *dsc*: días secos consecutivos, *tmedia*: temperatura media; *tmax*: temperatura máxima, *cobertura*: personas beneficiadas, *porc_imperm*: % de impermeabilidad; *demandaestival*: demanda estival de la demanda; *porc_bosque*: % de bosque; *porc_perturba*: % de pérdida de turbera, *porc_deforest*: % de deforestación;; *suma_solucion*: suma de soluciones ante cortes de suministro;; *sumcapafinanciera*: capacidad financiera, *ntec*: número de tecnologías y *totalfuenteadicional*: Total de fuentes adicionales.

En consecuencia, es interesante identificar que a lo largo del Componente Principal 1 las variables a lo largo de las cuales se ordenan los SSR son el % de deforestación por un extremo y % de cobertura de bosque por otro extremo. y a lo largo del Componente Principal 2 las

SSR se ordenan a lo largo de un gradiente de humedad dado por un extremo por DSC (días secos consecutivos) y por el otro por la humedad (*Figura 18*).

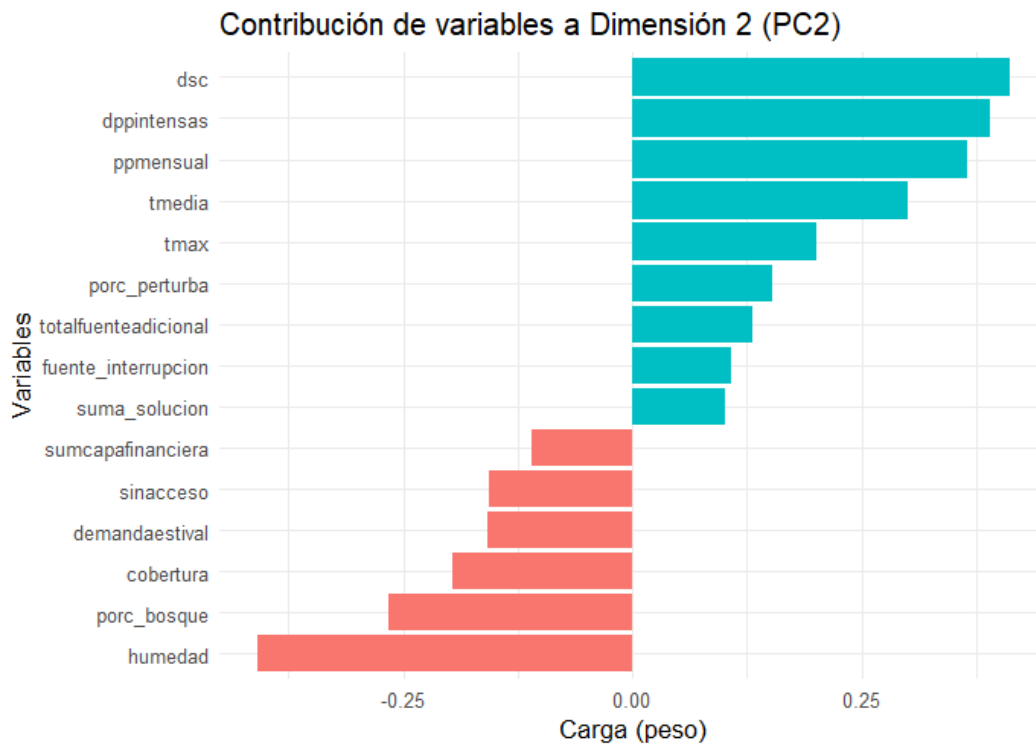


FIGURA 17B: CONTRIBUCIÓN DE VARIABLES A LA DIMENSIÓN 2 (PC2).

dppintensas: días de precipitaciones intensas; *ppmensual*: precipitaciones medias mensuales; *humedad*: humedad relativa; *dsc*: días secos consecutivos, *tmedia*: temperatura media; *tmax*: temperatura máxima, *cobertura*: personas beneficiadas, *porc_imperm*: % de impermeabilidad; *demandaestival*: demanda estival de la demanda; *porc_bosque*: % de bosque; *porc_perturba*: % de pérdida de turbera; *fuelle_interrupcion*: fuentes de interrupción; *suma_solucion*: Suma de soluciones ante cortes de suministro; *sumcapafinanciera*: capacidad financiera y *totalfuenteadicional*: Total de fuentes adicionales.

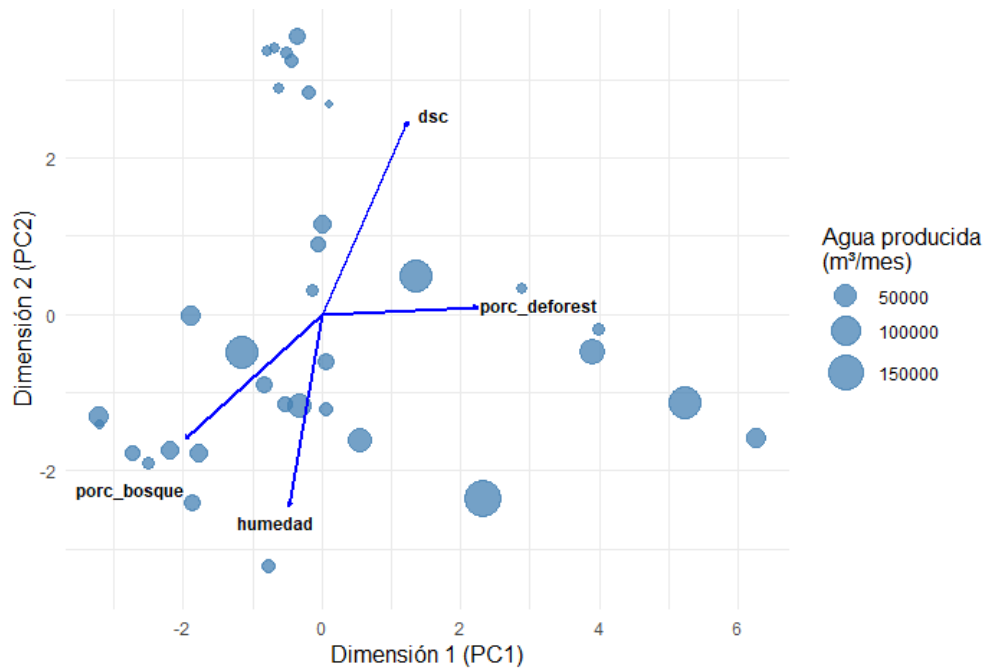


FIGURA 18: PRODUCCIÓN DE AGUA Y DIRECCIONES DE VARIABLES CLAVE EN EL ESPACIO PC1–PC2. *dsc*: días secos consecutivos, *porc_bosque*: % de bosque; *humedad*: humedad relativa y *porc_deforest*: % de deforestacion,;

5.2.2 Calidad: Ocurrencia de Problemas de calidad

El análisis de la ocurrencia de problemas de calidad del agua se realizó considerando 18 variables predictoras, de las cuales 9 corresponden a variables numéricas continuas, asociadas principalmente a condiciones ambientales, cobertura del suelo y capacidades operativas del sistema, y 9 variables categóricas, vinculadas a características de gestión, prácticas institucionales, percepción normativa y condiciones de infraestructura.

La calidad del agua fue analizada a partir de la frecuencia con que los servicios reportaron eventos que afectan el suministro, tales como turbidez, mal olor o sabor, según la percepción de los directivos y/u operadores del servicio. Esta información proviene de la *pregunta 28* de la encuesta, formulada en escala de Likert (del 1=nunca al 7= muy frecuentemente), que indaga explícitamente sobre la recurrencia de este tipo de eventos. Con el fin de facilitar el análisis e interpretación de los resultados, las categorías originales fueron agrupadas en tres niveles ordinales (alta, media y baja), los cuales representan frecuencias relativas de ocurrencia de problemas de calidad del agua. En consecuencia, los resultados presentados en

esta sección deben interpretarse como diferencias en la recurrencia percibida de eventos de afectación a la calidad del agua, y no como niveles absolutos de calidad ni como una medida directa de la severidad de dichos problemas.

El análisis comparativo de los predictores numéricos según la ocurrencia de problemas de calidad del agua (niveles alto, medio y bajo) muestra que mayoría de los predictores numéricos presenta un alto grado de solapamiento entre niveles de ocurrencia, con medianas similares entre los grupos de baja, media y alta, sin evidenciar patrones de separación consistentes (*Figura 19*).

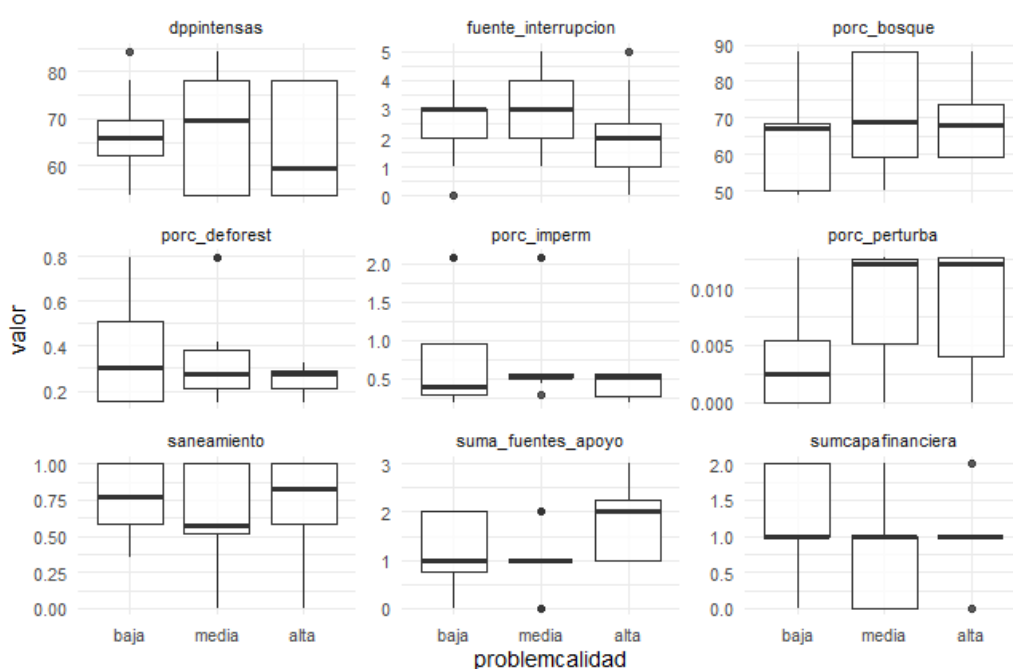


FIGURA 19. BOXPLOTS DE VARIABLES NUMÉRICAS POR NIVELES DE PROBLEMAS DE CALIDAD. *dppintensas*: días de precipitaciones intensas; *fuentes_interrupcion*: fuente de interrupción; *porc_bosque*: % de bosque; *porc_deforest*: % de deforestación; *porc_perturba*: % de pérdida de turbera; *saneamiento*: tipo de saneamiento; *suma_fuentes_apoyo*: suma de fuentes de apoyo, *sumcapafinanciera*: suma de capacidad financiera.

Variables como *días de precipitaciones intensas*, *fuentes de interrupción*, *saneamiento* y *suma de fuentes de apoyo* exhiben distribuciones comparables entre grupos, mientras que *% de pérdida de turbera*, *% de bosque* y *capacidad financiera* muestran una mayor dispersión intra-grupo, indicando una mayor heterogeneidad entre sistemas. En contraste, *% de deforestación* presenta una tendencia a valores más elevados en las categorías de media y

alta ocurrencia de problemas de calidad, sugiriendo una posible asociación con la recurrencia de eventos que afectan la calidad del agua, aunque con solapamiento entre distribuciones.

La distribución de los predictores numéricos según la ocurrencia de problemas de calidad del agua muestra, en términos generales, un alto grado de solapamiento entre las categorías de baja, media y alta. Para la mayoría de las variables, las medianas y rangos intercuartílicos son similares entre grupos, sin evidenciar patrones de diferenciación consistentes. En conjunto, los diagramas sugieren una capacidad limitada de estos predictores para discriminar entre los distintos niveles de ocurrencia de problemas de calidad del agua.

TABLA 6. TABLA DE FRECUENCIA DE VARIABLES CUALITATIVAS POR NIVELES DE OCURRENCIA DE PROBLEMAS DE CALIDAD (BAJA, MEDIA, ALTA).

Tipo de fuente						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
mixta	3	3	2	8.8	8.8	5.9
subterránea	5	2	3	14.7	5.9	8.8
superficial	4	9	3	11.8	26.5	8.8
Practica de soluciones basadas en la naturaleza						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	7	2	5	20.0	5.9	14.7
bajo	5	4	1	14.7	11.8	2.9
medio	0	8	2	0.0	23.5	5.9
Degradación del paisaje						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	3	2	2	8.8	5.9	5.9
bajo	6	6	5	17.6	17.6	14.7
medio	3	6	1	8.8	17.6	2.9
Estado de Infraestructura						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
Buena	10	4	3	29.4	11.8	8.8
Mala	0	2	0	0.0	5.9	0.0
Muy buena	1	1	1	2.9	2.9	2.9
Regular	1	7	4	2.9	20.6	11.8
Impacto de la Ley						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	2	1	3	5.9	2.9	8.8
bajo	5	7	3	14.7	20.6	8.8
medio	5	6	2	14.7	17.6	5.9

Conocimiento de la normativa						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	7	3	4	20.6	8.8	11.8
bajo	2	6	0	5.9	17.6	0.0
medio	3	5	4	8.8	14.7	11.8
Percepción de Capacitaciones						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	8	7	6	23.5	20.6	17.6
bajo	1	1	0	2.9	2.9	0.0
medio	3	6	2	8.8	17.6	5.9
Potabiliza el agua						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
0	0	2	3	0.0	5.9	8.8
1	12	12	5	35.3	35.3	14.7
Realiza acciones de monitoreo						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
0	1	4	2	2.9	11.8	5.9
1	11	10	6	32.4	29.4	17.6

Los resultados de las tablas de contingencia muestran que, en la variable tipo de fuente (subterránea, superficial o mixta), los servicios con captación superficial presentan mayor ocurrencia media de problemas de calidad (26.5%) superando a mixtas y subterráneas, lo que sugiere que la captación superficial podría asociarse a una mayor vulnerabilidad en la calidad del agua. Las fuentes mixtas y subterráneas presentan idéntico valor de ocurrencia alta de problemas de calidad (8.8%). En degradación del paisaje, bajo nivel de degradación percibido concentra simultáneamente las mayores proporciones en los tres niveles de ocurrencia de problemas de calidad, con 17.6% en problemática baja y media, y 14.7% en alta, mientras que la ocurrencia alto y media presentan porcentajes menores y distribuciones más acotadas.. En estado de infraestructura, la categoría *buena* agrupa la mayor proporción de casos en problemática baja (29.4%), seguida por regular, que se destaca en problemática media (20.6%) y alta (11.8%), mientras que muy buena y mala muestran ocurrencias bajas y patrones restringidos (*Figura 20*).

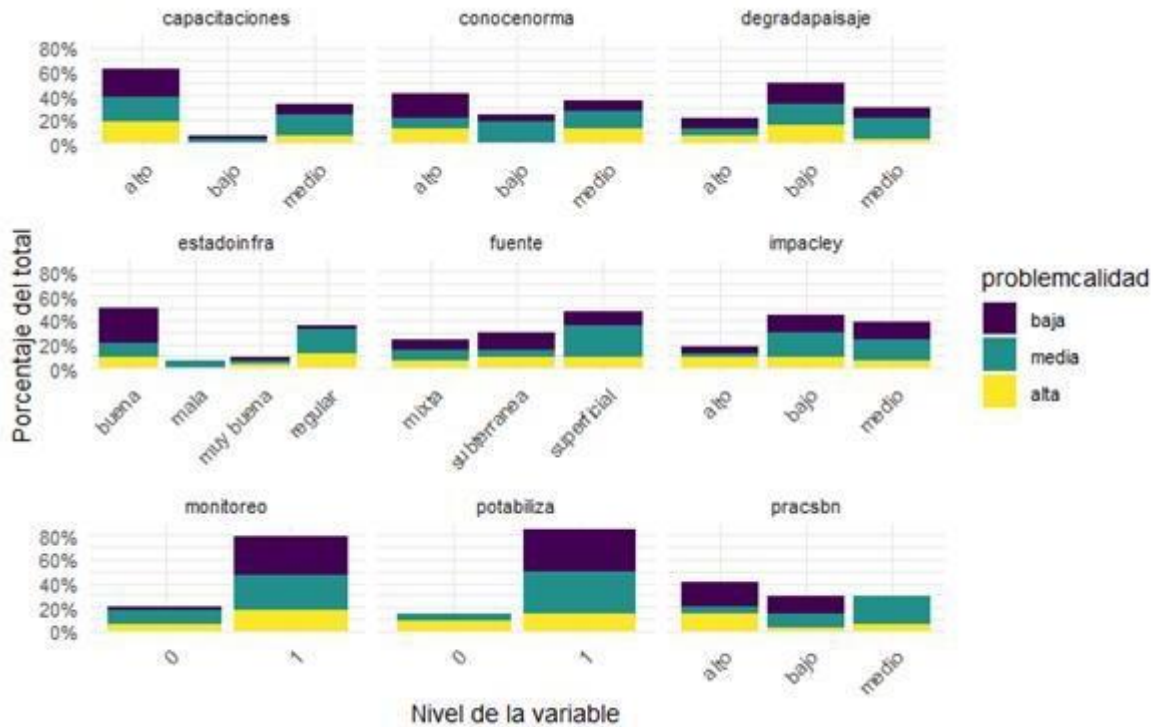


FIGURA 20. GRÁFICA DE BARRAS APILADAS (% DEL TOTAL) DE VARIABLES CATEGÓRICAS VERSUS NIVELES DE OCURRENCIA DE PROBLEMAS DE CALIDAD. *capacitaciones*: percepción de capacitaciones; *conocenorma*: conocimiento de la norma; *degradapaisaje*: percepción de la degradación del paisaje; *estadoinfra*: estado de la infraestructura; *fuentes*: fuente de captación, *impacley*: impacto de la ley; *monitoreo*: realiza actividad de monitoreo; *potabiliiza*: realiza potabilización y *pracsbn*: practica SBN

TABLA 7. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE KRUSKAL–WALLIS SEGÚN NIVELES DE PROBLEMAS DE CALIDAD CON VARIABLES DESCRIPTIVAS DEL MODELO TEÓRICO.

Variable	H _{kw}	p _{kw}	ε ² (Epsilon ²)
% de pérdida de turbera	5.63	0.060	0.170
Suma de fuentes de apoyo	5.18	0.075	0.157
Capacidad financiera	4.15	0.126	0.126
% de impermeabilidad	1.98	0.372	0.060
% de bosque	1.84	0.398	0.056

Fuentes de interrupción	1.72	0.424	0.052
Saneamiento	1.20	0.550	0.036
Días de precipitaciones intensas	0.70	0.703	0.021
% de deforestación	0.23	0.891	0.007

La prueba de Kruskal–Wallis aplicada a los predictores numéricos del modelo teórico de problemas de calidad, muestra diferencias leves pero no significativas entre las categorías de ocurrencia de problemas de calidad. Las dos variables con mayor evidencia de variación entre grupos son % de pérdida de turbera ($H = 5.63$; $p = 0.060$; $\epsilon^2 = 0.170$) y suma de fuentes de apoyo ($H = 5.18$; $p = 0.075$; $\epsilon^2 = 0.157$). Ambas presentan valores marginales y tamaños de efecto moderados, lo que sugiere una señal débil de diferencias entre categorías, coherente con el aumento de dispersión observado previamente en los boxplots. Sin embargo, estas diferencias no alcanzan significancia estadística bajo un umbral convencional de 0.05. El resto de las variables presenta valores p altos ($p > 0.12$) y tamaños de efecto bajos ($\epsilon^2 < 0.13$), indicando ausencia de diferencias relevantes entre niveles de problemas de calidad.

Adicionalmente, las diferencias estandarizadas de medias muestran contrastes más marcados que los observados en Kruskal–Wallis, lo que permite identificar pares de comparación donde ciertos predictores presentan diferencias moderadas o grandes entre niveles de problemas de calidad. En particular, suma de fuentes de apoyo muestra los efectos más pronunciados, con diferencias grandes entre los niveles baja y medias respecto al alta ($d = -0.98$ y -1.15 respectivamente), lo que sugiere que los sistemas con mayor necesidad de apoyo externo tienden a concentrarse en categorías de ocurrencia alta de problemas de calidad. De manera similar, % de pérdida de turbera presenta un efecto grande entre baja–media ($d = -1.09$) y baja–alta ($d = -0.90$), indicando que los mayores niveles de pérdida de turbera se asocian consistentemente con problemas de calidad más elevados.

TABLA 8: DIFERENCIAS ESTANDARIZADAS DE MEDIAS (SMD, COHEN’S D) POR PARES DE COMPARACIÓN ENTRE NIVELES DE OCURRENCIA DE PROBLEMAS DE CALIDAD.

Variable	SMD Baja– Media	SMD Baja– Alta	SMD Media– Alta
----------	--------------------	-------------------	--------------------

Días de precipitaciones intensas	-0.17	0.19	0.32
% de deforestación	0.17	0.58*	0.47
% de pérdida de turbera	-1.09*	-0.90**	0.11
% de impermeabilidad	0.08	0.57*	0.63*
% de bosque	-0.55*	-0.58*	0.04
Suma de fuentes de apoyo	0.02	-0.98**	-1.15**
Capacidad financiera	0.79*	0.42	-0.43
Saneamiento	0.35	0.14	-0.18
Fuentes de interrupciones	-0.30	0.27	0.53*

% de deforestación y % de impermeabilidad muestran efectos medianos en algunos contrastes específicos (por ejemplo, baja–alta en % de deforestación = 0.58, y media–alta en % de impermeabilidad, $d = 0.63$), mientras que porcentaje de bosque presenta diferencias medianas entre baja–media y baja–alta, coherentes con cambios moderados en la cobertura boscosa entre grupos. Por su parte, la Capacidad financiera evidencia un tamaño de efecto mediano entre baja–media ($d = 0.79$), aunque sin un patrón consistente respecto a los otros contrastes. El resto de las variables, incluyendo días de precipitaciones intensas, saneamiento y fuente de interrupción, presenta efectos pequeños o inconsistentes, reflejando diferencias mínimas entre categorías.

En conjunto, los resultados de SMD confirman que cuatro variables, % de pérdida de turbera, suma de fuentes de apoyo, % de deforestación y % de impermeabilidad, exhiben diferencias sustantivas entre niveles de problemas de calidad, especialmente en comparaciones que involucran la categoría alta. Esto sugiere que la perturbación territorial, la necesidad de apoyo

externo y ciertos elementos de degradación o impermeabilización del entorno presentan mayor capacidad discriminante a nivel descriptivo que el resto de los predictores numéricos.

Los resultados del test de Chi-cuadrado y Fisher indican que tres de las nueve variables categóricas muestran asociaciones estadísticamente relevantes con la ocurrencia de problemas de calidad del agua. En particular, prácticas de soluciones basadas en la naturaleza presentan la relación más consistente, con valores significativos tanto en Chi-cuadrado ($\chi^2 = 12.84$; $p = 0.012$) como en Fisher ($p = 0.006$). Esto sugiere que las prácticas de sostenibilidad o buenas prácticas implementadas por los sistemas estarían vinculadas a los niveles de problemas de calidad, con diferencias claras en la distribución entre grupos.

TABLA 9. RESULTADOS DEL TEST DE CHI-CUADRADO / FISHER SEGÚN NIVELES DE PROBLEMAS DE CALIDAD (*PROBLEMA DE CALIDAD*) PARA LA VARIABLES DESCRIPTIVAS DEL MODELO TEÓRICO.

Variable	χ^2	gl	Celdas <5	p_chi2	p_fisher
Prácticas de SBN	12.84	4	8	0.012	0.006**
potabiliza	5.38	2	3	0.068	0.063**
Estado de la infraestructura	11.05	6	10	0.087	0.045**
Conocimiento de la norma	7.53	4	8	0.110	0.131
Monitoreo	1.74	2	3	0.418	0.486
Fuente de captación	3.44	4	7	0.487	0.484
Impacto de la ley	3.36	4	6	0.500	0.565
Degradación de paisaje	2.57	4	7	0.632	0.657
Percepción de capacitaciones	2.03	4	7	0.730	0.834

El estado de infraestructura también alcanza significancia mediante Fisher ($p_{\text{fisher}} = 0.045$), lo que indica que el estado de la infraestructura presenta diferencias entre niveles de ocurrencia de problemática, aunque con alta proporción de celdas con frecuencias esperadas bajas (10 celdas < 5), por lo que estos resultados deben interpretarse con cautela.

Adicionalmente, Potabiliza muestra resultados cercanos al umbral de significancia ($\chi^2 = 5.38$; $p = 0.068$; Fisher = 0.063), De forma similar, estado de infra muestra significancia mediante el test exacto de Fisher ($p = 0.045$), lo que sugiere una posible asociación entre la potabilización y el estado de la infraestructura con respecto a la frecuencia de problemas de calidad, aunque la evidencia es moderada.

En contraste, el resto de las variables descriptoras (conocimiento de la norma, monitoreo, fuente, impacto de la ley, percepción de la degrada de paisaje y percepción de capacitaciones) no presenta evidencia estadística de asociación con los niveles de ocurrencia de problemas de calidad, con valores p altos, lo que indica que sus distribuciones son similares entre los distintos niveles del problema

En conjunto, los resultados sugieren que las diferencias entre niveles de problemas de calidad del agua se explican principalmente por variables asociadas a prácticas sostenibles, estado de la infraestructura y potabilización de las aguas, mientras que otros factores institucionales o de operación no presentan relación estadísticamente observable en este análisis.

5.2.3. Continuidad de suministro: Percepción de la Interrupción del suministro

Al igual que calidad la continuidad de suministro fue evaluada a una variable categórica ordinal: *percepción de interrupción* que capta la frecuencia con que los servicios han experimentado cortes en el suministro, según la percepción de los responsables de operación. Esta información proviene de la pregunta 12 de la encuesta, formulada en escala de Likert (del 1=nunca al 7= muy frecuentemente), que indaga explícitamente sobre la recurrencia de interrupciones. Con el fin de facilitar el análisis e interpretación de los resultados, las categorías originales fueron agrupadas en tres niveles ordinales (alta, media y baja), los cuales representan frecuencias relativas de ocurrencia de interrupciones del suministro.

El análisis de la ocurrencia de interrupciones del suministro se realizó considerando 25 variables predictoras, de las cuales 13 corresponden a variables numéricas continuas, asociadas principalmente a condiciones climáticas, características estructurales del sistema y capacidades operativas y financieras, y 12 variables categóricas, vinculadas a aspectos de gestión, operación, percepción institucional, organización y estado de la infraestructura.

La comparación de las variables numéricas según los niveles de interrupción del suministro muestra que, en la mayoría de los predictores, las distribuciones son muy similares entre baja, media y alta ocurrencia de interrupción (diez de los trece descriptores cuantitativos), con más de la mitad de las variables con medias cercanas entre sí y amplios solapamientos en los rangos intercuartílicos, salvo en suma de soluciones y capacidad financiera. En variables como antigüedad, días de precipitaciones intensas, fuente de interrupción, promedio de precipitaciones mensual, usos que generan competencia, días con temperatura bajo 0°C y fuente adicional, no se observan desplazamientos notorios de la mediana ni cambios evidentes en la dispersión entre los tres niveles.

Algunas variables, sin embargo, muestran diferencias en la dispersión y de media en alguno de los niveles (días secos consecutivos, número de tecnologías empleadas, suma de soluciones y capacidad financiera) aprecia una ligera elevación de la mediana en el nivel alto de interrupción. En suma, de fenómenos meteorológicos extremos (FME) que generan corte y suma de fuentes de apoyo se observan casos atípicos puntuales, pero sin un patrón consistente de incremento o disminución entre categorías. Por último, días de temperaturas bajo 0°C presenta medianas similares, aunque con una dispersión algo mayor en interrupción alta.

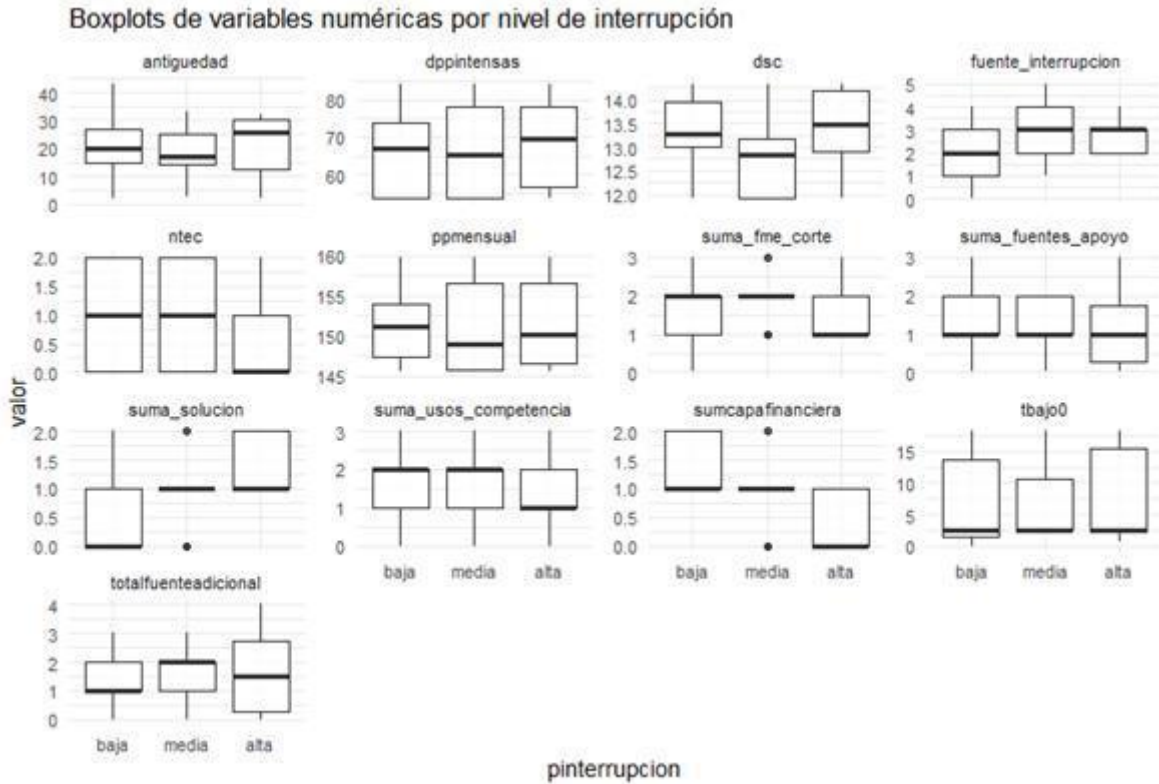


FIGURA 21: BOXPLOTS DE VARIABLES NUMÉRICAS POR NIVELES DE INTERRUPCIÓN DE SUMINISTRO DE AGUA. *Antigüedad*: antigüedad del SSR; *dppintensas*: días de precipitaciones intensas; *dsc*: días secos consecutivos; *fuentes_interrupción*: fuentes de interrupción; *ntec*: número de tecnologías; *ppmensual*: precipitaciones medias mensuales; *suma_fme_corte*: suma de cortes por FME; *suma_fuentes_apoyo*: suma de fuentes de apoyo; *suma_solucion*: suma de soluciones antes cortes; *suma_usos_competencia*: suma de usos que compiten; *sumcapafinanciera*: capacidad financiera; *tbajo0*: días de temperaturas bajo 0°C y *totalfuenteadicionales*: total de fuentes adicionales de agua.

TABLA 10. TABLA DE FRECUENCIA DE VARIABLES CATEGÓRICAS POR NIVELES DE FRECUENCIA DE PROBLEMAS DE CALIDAD (BAJA, MEDIA, ALTA).

Tipo de fuente						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
mixta	5	3	0	14.7	8.8	0.0
subterránea	5	1	1	14.7	2.9	11.8
superficial	5	5	6	14.7	14.7	17.6
Percepción de ocurrencia de escasez						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
0	7	3	2	20.6	8.8	5.9
1	8	6	8	23.5	17.6	23.5

Estado de la infraestructura						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
buena	10	4	3	29.4	11.8	8.8
mala	0	0	2	0.0	0.0	5.9
muy buena	3	0	0	8.8	0.0	0.0
regular	2	5	5	5.9	14.7	14.7
Camión						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
Alto	0	0	1	0.0	0.0	2.9
Baja	5	6	4	14.7	17.6	11.8
Medio	1	0	1	2.9	0.0	2.9
Nunca	9	3	4	26.5	8.8	2.9
Frecuencia de cortes por FME						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	4	1	6	11.8	2.9	17.6
bajo	4	3	1	11.8	8.8	2.9
medio	7	5	3	20.6	14.7	8.8
Percepción de capacitaciones						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	12	4	5	35.3	11.8	14.7
bajo	0	1	1	0.0	2.9	2.9
medio	3	4	4	8.8	11.8	11.8
Reparación						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
0	5	6	5	14.7	17.6	14.7
1	10	3	5	29.4	8.8	17.7
Discontinuidad administrativa						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
0	14	5	7	41.2	14.7	20.6
1	1	4	3	2.9	11.8	8.8
Participación administrativa						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	4	1	1	11.8	2.9	2.9
bajo	8	7	7	23.5	20.6	20.6
medio	3	1	2	8.8	2.9	5.9
Preocupación de cambio climático						
Nivel	Baja	Media	Alta	Baja %	Media %	Alta %
alto	9	4	6	26.5	11.8	17.6
bajo	2	1	0	5.9	2.9	0.0

medio	4	4	4	11.8	11.8	11.8
-------	---	---	---	------	------	------

La distribución porcentual de los niveles de ocurrencia de interrupción revela patrones heterogéneos entre las distintas variables categóricas, con algunas asociaciones más marcadas en variables operativas y de infraestructura, mientras que otras muestran distribuciones más homogéneas (*Tabla 10 y Figura 22*).

En tipo de fuente de captación, los sistemas superficiales concentran la mayor proporción de casos con interrupción (47% acumulado), en comparación con las fuentes mixtas y subterráneas, lo que sugiere una mayor exposición a discontinuidades en sistemas dependientes de captaciones superficiales. Un patrón similar se observa en percepción de ocurrencia de escasez, donde los SSR que reportan escasez (1) presentan una mayor representación tanto en ocurrencia de interrupción media (17.6%) como en alta (23.5%), respecto de los sistemas sin escasez declarada.

En reparación, los sistemas que reportan reparación (1) concentran un porcentaje mayor en ocurrencias de interrupción baja (29.4%), lo que podría reflejar esfuerzos correctivos para mitigar cortes; mientras que, en camión aljibes, el uso bajo o nulo (nunca) concentran la mayoría de los casos, con presencia moderada en interrupciones media y baja, aunque sin un patrón claro.

Las variables de estado de infraestructura muestran mayor diferenciación: sistemas con infraestructura mala aportan exclusivamente casos a interrupción alta (5.9%), mientras que las categorías buena y regular presentan mayor dispersión entre niveles. La variable frecuencia de corte por FME indica que niveles altos de eventos se asocian a mayor proporción de interrupción alta (17.6%), coherente con la vulnerabilidad operativa frente a eventos extremos.

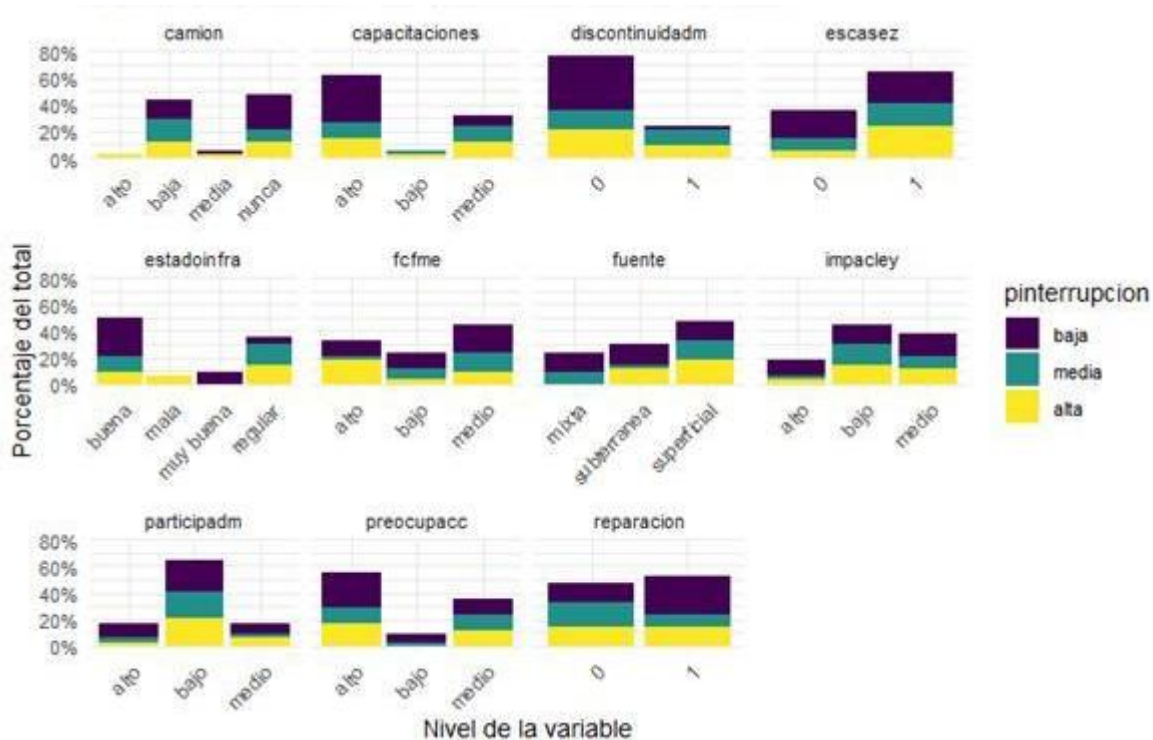


FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS NIVELES DE INTERRUPTIÓN DEL SUMINISTRO SEGÚN VARIABLES CATEGÓRICAS DEL SISTEMA SSR. *camión*: camión aljibes; *capacitaciones*: participación en capacitaciones; *escasez*: percepción de ocurrencia de escasez, *estadoinfra*: estado de infraestructura; *fcfme*: frecuencia de cortes por FEM; *fuente*: fuente de captación de agua; *impacley*: impacto de la ley; *participadm*: participación de socios en la administración; *preocupacc*: preocupación por el cambio climático y *reparación*: reparación de fallas.

En las dimensiones de gestión, tales como la preocupación por el cambio climático y la participación de los socios en la administración, las distribuciones se presentan más equilibradas entre los distintos niveles de ocurrencia de interrupción del suministro. No obstante, se observa una mayor concentración de casos en las categorías de alta preocupación por el cambio climático y baja participación de los socios en la administración, en comparación con las restantes categorías. Adicionalmente, la variable discontinuidad administrativa presenta uno de los patrones más claros: servicios sin discontinuidad (0) concentra la mayoría de los casos totales en interrupción baja (41.2%), mientras que aquellos que sí han experimentados discontinuidad (1) aumenta su presencia relativa en media (11.8%) y alta (8.8%), lo que sugiere una relación entre la discontinuidad de la administración y cortes más frecuentes.

Los SSR con mayor frecuencia de capacitaciones concentran una mayor proporción de ocurrencia de interrupción baja (35.3%), lo que podría reflejar un efecto positivo de capacidades operativas en la reducción de cortes. Finalmente, Impacto de la ley contiene una distribución equilibrada en todas las categorías, aunque una menor proporción de los niveles medio y bajo de ocurrencia de interrupción en percepción de alto impacto de la ley.

Los resultados de la prueba de Kruskal–Wallis muestran que solo dos predictores numéricos presentan diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de ocurrencia de interrupción de suministro ($p < 0.05$). La variable capacidad financiera exhibe el contraste más intenso ($H = 13.47$, $p = 0.001$), con un tamaño de efecto alto ($\epsilon^2 = 0.408$), indicando que los sistemas con mayores niveles de interrupción tienden a concentrarse en categorías inferiores de capacidad financiera. De forma similar, suma de soluciones muestra diferencias significativas ($H = 9.69$, $p = 0.008$; $\epsilon^2 = 0.294$), lo que sugiere que la frecuencia de soluciones implementadas varía de manera relevante entre los niveles de ocurrencia de interrupción, con mayor presencia en categorías medias y altas (*Tabla 11*).

TABLA 11. RESULTADOS DEL TEST DE KRUSKAL–WALLIS SEGÚN NIVELES DE INTERRUPCIÓN DE SUMINISTRO DE AGUA CON VARIABLES DESCRIPTIVAS DEL MODELO TEÓRICO.

Variable	H_kw	p_kw	ϵ^2 (Epsilon²)
Capacidad financiera	13.47	0.001	0.408
Suma de soluciones	9.693	0.008	0.294
Fuente de interrupción	4.823	0.090	0.146
Numero de tecnologías	2.193	0.334	0.066
Días secos consecutivos	1.939	0.379	0.059
Suma de cortes por FME	1.190	0.552	0.036
Suma de fuentes de apoyo	0.994	0.608	0.030
Días de temperaturas bajo 0°C	0.940	0.625	0.028
Suma de usos que compiten	0.816	0.665	0.025
Antigüedad	0.464	0.793	0.014
Días de precipitaciones intensas	0.444	0.801	0.013
Precipitaciones medias mensual	0.037	0.982	0.001
Total de fuentes adicional	0.014	0.993	0.000

Las demás variables presentan valores p superiores a 0.05 y tamaños de efecto bajos ($\epsilon^2 <$

0.15), lo que indica ausencia de diferencias sistemáticas entre los niveles de interrupción. En particular, fuentes de interrupción muestra una señal marginal ($H = 4.82$, $p = 0.089$; $\varepsilon^2 = 0.146$), pero no alcanza significancia convencional. El resto de los indicadores ambientales (días de precipitaciones intensas, días secos consecutivos), operativos (Suma de cortes por FME, suma de usos que compiten, antigüedad, total de fuentes adicional) y de gestión (suma de fuentes de apoyo,) muestra uniformidad entre categorías, evidenciando una baja capacidad discriminante en esta fase descriptiva.

Los tamaños de efecto estandarizados son consistentes y evidencian contrastes más marcados que los detectados por Kruskal–Wallis en algunas variables, permitiendo complementar la lista de predictores numéricos que diferencian sustantivamente los niveles de interrupción. Nuevamente las variables con efectos más pronunciados es capacidad financiera y suma solución con tamaños de efecto grandes a muy grandes en las tres comparaciones (*Tabla 12*) Estos valores indican que tanto la capacidad financiera como la suma de soluciones implementadas explica diferencias sustantivas entre los niveles de interrupción, coherente con la fuerte señal estadística ya observada en Kruskal–Wallis.

La variable fuente de interrupciones evidencia diferencias relevantes entre niveles de interrupción, con tamaños de efecto grandes en las comparaciones baja–media y baja–alta. Otros predictores, como número de tecnologías, suma de cortes por FME y suma de usos que compiten, muestran efectos pequeños a moderados únicamente entre media–alta, sin un patrón consistente en el resto de los contrastes. En cambio, variables como antigüedad, días de precipitaciones intensas, precipitaciones medias mensual, días de temperaturas bajo 0°C, días secos consecutivos y total de fuentes adicional presentan efectos bajos en todos los pares, indicando escasa capacidad para discriminar entre los niveles de interrupción.

TABLA 12. DIFERENCIAS ESTANDARIZADAS DE MEDIAS (SMD, COHEN’S D) POR PARES DE COMPARACIÓN ENTRE NIVELES DE INTERRUPCIÓN DE SUMINISTRO DE AGUA.

Variable	SMD Baja–Media	SMD Baja–Alta	SMD Media–Alta
Antigüedad	0.167	-0.078	-0.240
Días de precipitaciones intensas	-0.079	-0.262	-0.178
Precipitaciones medias mensuales	0.027	-0.127	-0.140

Días secos consecutivos	0.482	-0.028	-0.491
Días de temperatura bajo 0°C	-0.074	-0.154	-0.093
Total, de fuente adicionales	-0.026	-0.142	-0.112
Suma de soluciones	-0.568	-1.457*	-0.916*
Suma de usos que compiten	-0.067	0.309	0.377
Fuente de interrupciones	-0.889	-0.683	0.378
Suma de cortes por FME	-0.326	0.086	0.391
Suma de fuentes de apoyo	0.250	0.354	0.143
Capacidad financiera	0.941*	1.958*	0.877*
Número de tecnologías	0.127	0.630	0.475

Los resultados de Chi-cuadrado y Fisher muestran que únicamente el estado de infraestructura presenta una asociación significativa con los niveles de interrupción ($p_{\text{fisher}} = 0.032$). La presencia de valores esperados bajos obliga a interpretar estos resultados con cautela, pero el patrón general indica que los sistemas con infraestructura regular o mala suelen presentar mayor proporción en interrupción alta. El resto de las variables categóricas presenta valores p alto y distribuciones ampliamente solapadas entre niveles, sin evidencias de asociación estadística significativa.

TABLA 13. RESULTADOS DEL TEST DE CHI-CUADRADO / FISHER SEGÚN NIVELES DE INTERRUPCIÓN DE SUMINISTRO PARA LA VARIABLES DESCRIPTIVAS DEL MODELO TEÓRICO.

Variable	χ^2	gl	Celdas <5	p_chi2	p_fisher
Estado de infraestructura	13.998	6	9	0.030*	0.032
Discontinuidad administrativa	4.791	2	3	0.091	0.089
Fuente de captación	5.912	4	8	0.206	0.173
Suma de cortes por FME	5.717	4	8	0.221	0.266
Reparación	2.558	2	3	0.278	0.283
Participación en capacitaciones	4.353	4	6	0.360	0.269
percepción de la Escasez	1.889	2	2	0.389	0.389
Frecuencia de Camión Aljibes	5.704	6	10	0.457	0.474
Preocupación por el cambio climático	2.161	4	5	0.706	0.775
Participación de socios en la administración	2.118	4	6	0.714	0.796

Impacto de la Ley	2.058	4	7	0.725	0.803
-------------------	-------	---	---	-------	-------

5.2.3.1 Causas de la interrupción

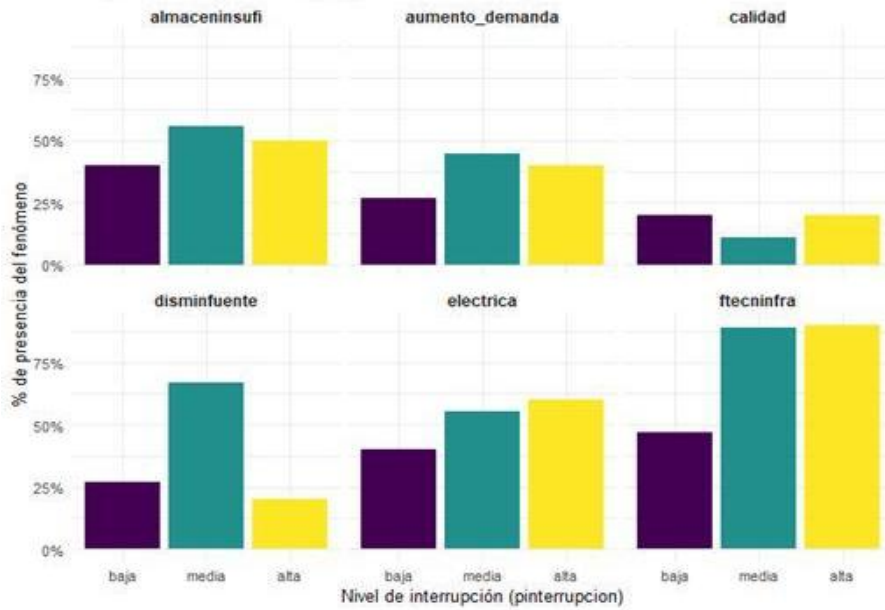


FIGURA 23: FACTORES REPORTADOS COMO CAUSAS VERSUS NIVELES DE OCURRENCIA DE INTERRUPCIONES DEL SUMINISTRO DE AGUA EN SERVICIOS SANITARIOS RURALES.

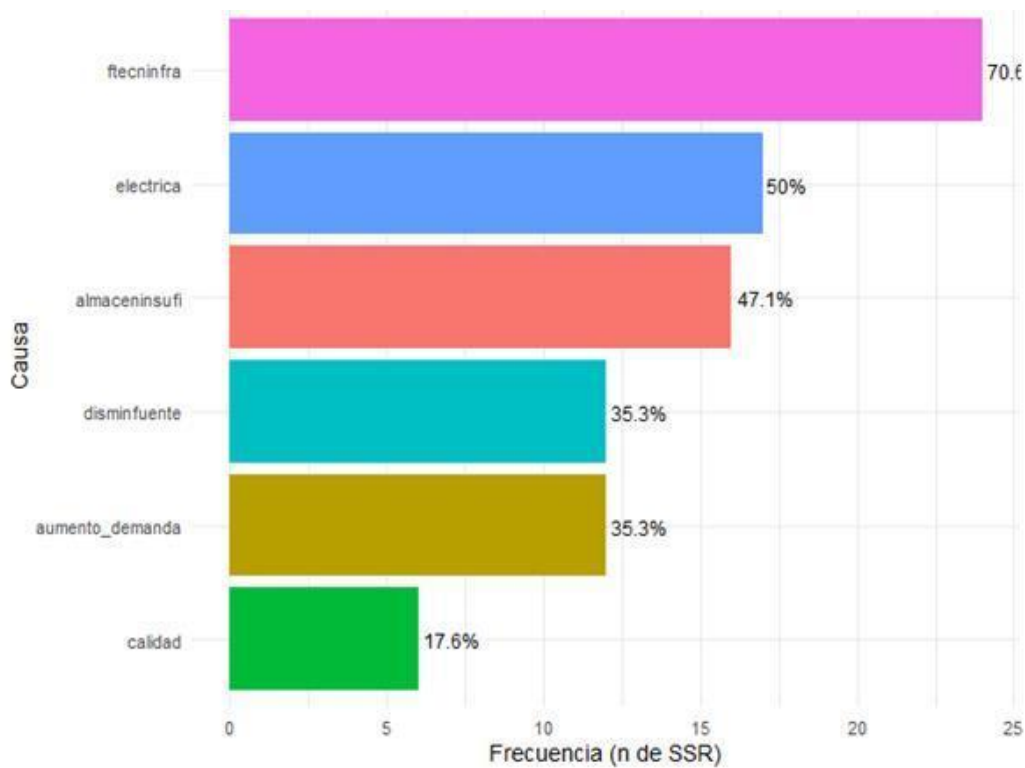


FIGURA 24: FRECUENCIA DE CAUSAS REPORTADAS DE INTERRUPCIÓN DEL SUMINISTRO DE AGUA EN SSR.

Las Figuras 23 y 24 muestran que las interrupciones del suministro se asocian a múltiples causas, las cuales se distribuyen de manera no uniforme entre los distintos niveles de ocurrencia de interrupción. Asimismo, se observa que en los SSR las interrupciones pueden responder a combinaciones de causas, evidenciando un carácter multicausal del fenómeno; siendo la falla de técnica y de infraestructura la más preponderantes en niveles de interrupción media y alta. Seguido por la contribución de fallas eléctricas, disminución de fuentes. Por el contrario, la calidad es el factor que menos aporta a la ocurrencia de cortes. En el caso de variables aumento de la demanda y disminución de fuente tiene un mayor aporte a las interrupciones de niveles medios (Figura 22).

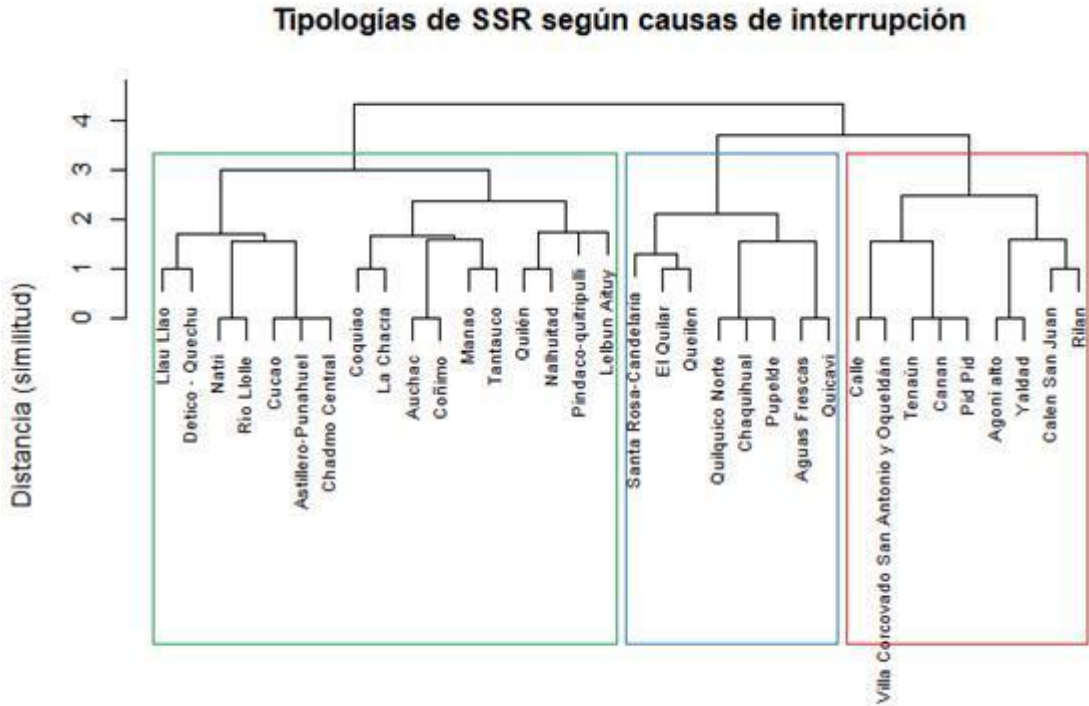


FIGURA 25: DENDROGRAMA DE CLASIFICACIÓN JERÁRQUICA DE SSR EN FUNCIÓN DE LAS CAUSAS DE INTERRUPCIÓN DEL SUMINISTRO (MÉTODO WARD.D2).

Los patrones de interrupciones observados en los SSR muestran una organización natural en tres tipologías bien diferenciadas según la presencia simultánea de distintas causas. El dendrograma construido mediante agrupamiento jerárquico (Ward.D2) revela que los sistemas no se interrumpen por razones aisladas, sino por combinaciones específicas de

factores que tienden a repetirse dentro de cada grupo y que reflejan vulnerabilidades comunes (*Figura 25*).

El primer grupo, integrado por 17 SSR (cuadro verde), concentra las configuraciones más complejas: combina altos niveles de fallas técnicas y de infraestructura, presencia del 100% de problemas eléctricos y proporciones moderadas de disminución de la fuente y aumento de la demanda. Esta acumulación de causas indica sistemas expuestos a multicausalidad operativa, donde la limitada capacidad instalada y la dependencia eléctrica aumentan la probabilidad de interrupciones recurrentes. Las barras apiladas confirman que estas causas se concentran principalmente en Castro, Chonchi, y Dalcahue.

El segundo grupo (9 SSR cuadro rojo) exhibe un patrón distinto, dominado por insuficiencia de almacenamiento, disminución de la fuente y mayor presión por demanda. A diferencia del grupo anterior, aquí los problemas eléctricos prácticamente no aparecen, lo que sugiere sistemas cuya vulnerabilidad se explica por restricciones de oferta hídrica más que por fallas técnicas. Las barras apiladas muestran que estos factores son particularmente frecuentes en Castro, Dalcahue y Quellón, reformaba a idea de un déficit estructural en la disponibilidad o gestión de agua cruda.

El tercer grupo (8 SSR, cuadro azul) corresponde a SSR con una menor carga global de causas. Presentan niveles moderados de fallas de infraestructura, baja presencia de problemas de almacenamiento o demanda, pero una mayor proporción relativa de problemas de calidad del agua. Se trata de sistemas donde las interrupciones se explican por fallas acotadas y específicas, más que por multicausalidad o presiones estructurales. Este patrón coincide con lo observado en comunas como Queilen y Ancud donde los problemas de calidad o aumento de la demanda aparecen con mayor representación en el gráfico porcentual. Finalmente cabe destacar que Quemchi no presenta interrupción. Sin embargo, solo se contaba con una observación descriptiva de dicha comuna por lo cual no se debe considerar que en dicha zona exista menores recurrencias a las interrupciones (*Figura 26*).

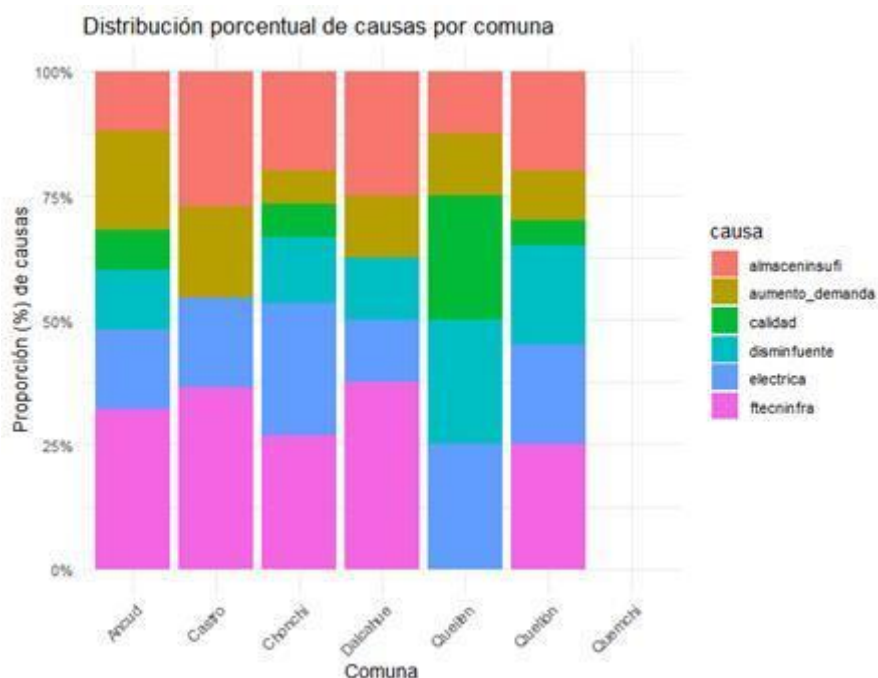


FIGURA 26: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LAS CAUSAS DE INTERRUPCIÓN DEL SUMINISTRO POR COMUNA.

En conjunto, estos resultados muestran que los SSR se diferencian claramente según el tipo de vulnerabilidad predominante: operativa y multicausal (grupo 1), estructural-hídrica (grupo 2) o acotada y centrada en la calidad del agua (grupo 3). Las distribuciones comunales de causas permiten reforzar esta interpretación, mostrando que ciertos territorios concentran combinaciones específicas de factores que explican por qué algunos SSR presentan interrupciones más complejas que otros. Este patrón permite identificar tipologías de riesgo útiles para orientar acciones focalizadas de inversión, fortalecimiento técnico y planificación hídrica.

5.2.3.2 uso del agua

El análisis muestra cómo los distintos usos del agua (riego, ganado, turismo, forestal y acuicultura) se relacionan de manera heterogénea con los niveles de interrupción del suministro en los SSR, observándose mayores proporciones de turismo y ganado en sistemas con baja interrupción y una distribución más equilibrada de usos en niveles medios y altos. Si bien los SSR con interrupciones bajas tienden a presentar más actividades vinculadas al turismo y ganadería, los sistemas con niveles medios incluyen además un porcentaje

relevante de acuicultura, mientras que en los de interrupción alta predominan riego, turismo y ganado (Figura 27 y 28).

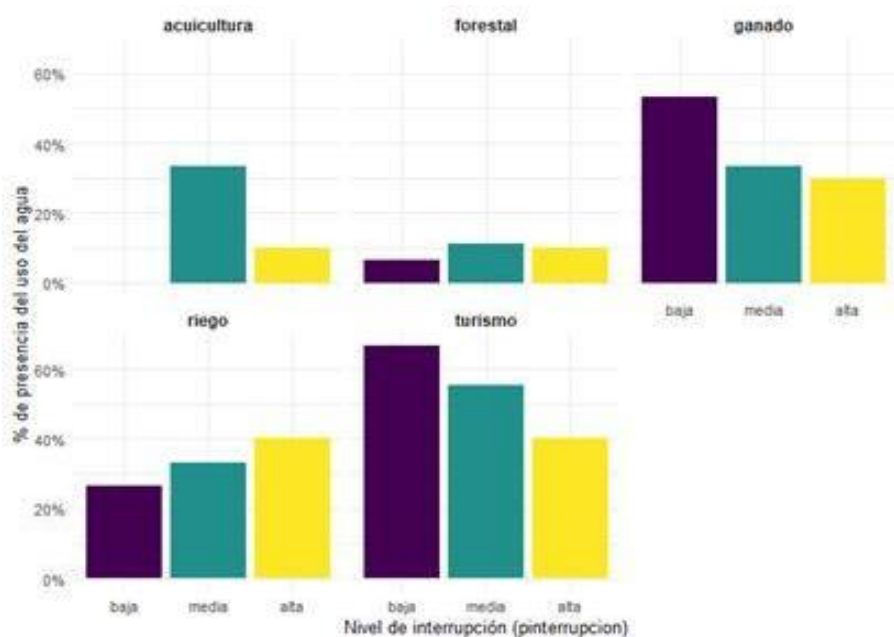


FIGURA 27: FACTORES REPORTADOS USOS ADICIONALES QUE COMPITEN VERSUS NIVELES DE OCURRENCIA DE INTERRUPCIÓN.

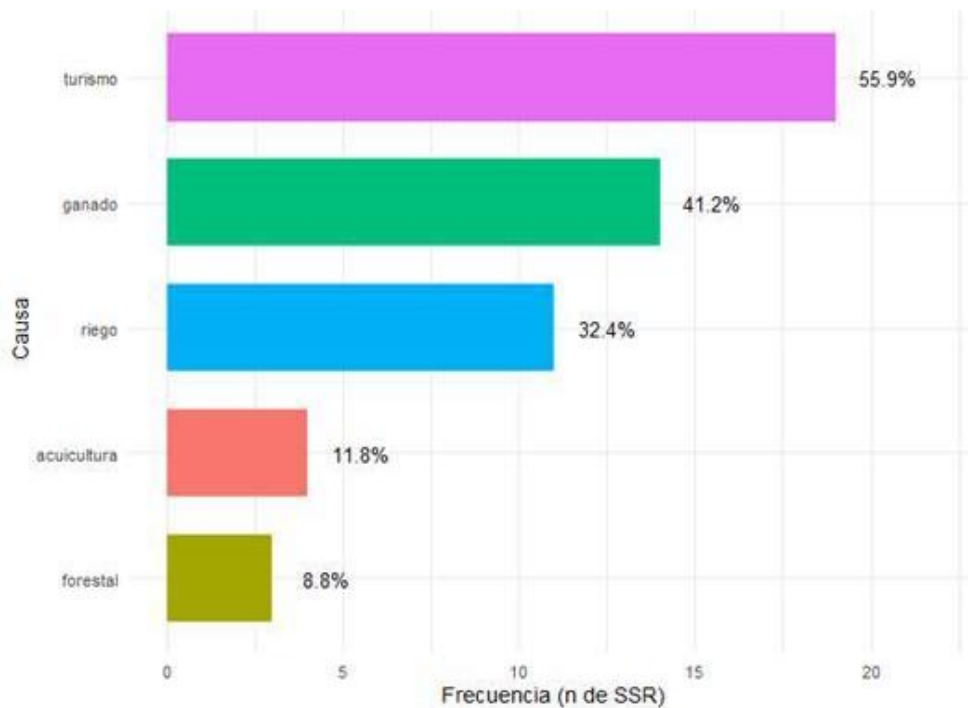


FIGURA 28: FRECUENCIA DE USOS QUE COMPITEN REPORTADOS.

El dendrograma muestra la agrupación jerárquica de los SSR según la presencia simultánea de distintos usos del agua en su territorio: riego, ganadería, turismo, forestal y acuicultura. La metodología Ward.D2 identifica tres tipologías claramente diferenciadas. El primer grupo (cuadro verde) reúne 18 SSR ubicados en comunas donde predominan los usos ganaderos y turísticos, acompañados en algunos casos por riego, lo que refleja entornos con actividades productivas tradicionales y un componente turístico consolidado. El segundo grupo (cuadro azul) concentra 5 SSR asociados a combinaciones más acotadas de usos, generalmente vinculados al riego y ganadería, pero con baja presencia de actividades intensivas como acuicultura o forestal. El tercer grupo (cuadro rojo) reúne 11 SSR localizados en zonas donde la acuicultura tiene un papel relevante, especialmente en Quellón, combinándose en algunos casos con ganadería o turismo. En conjunto, estos clústeres muestran que los SSR se organizan territorialmente según la estructura productiva que rodea cada sistema, lo que influye en los niveles de presión sobre el recurso hídrico y en los riesgos de competencia local por el agua (*Figura 29*).

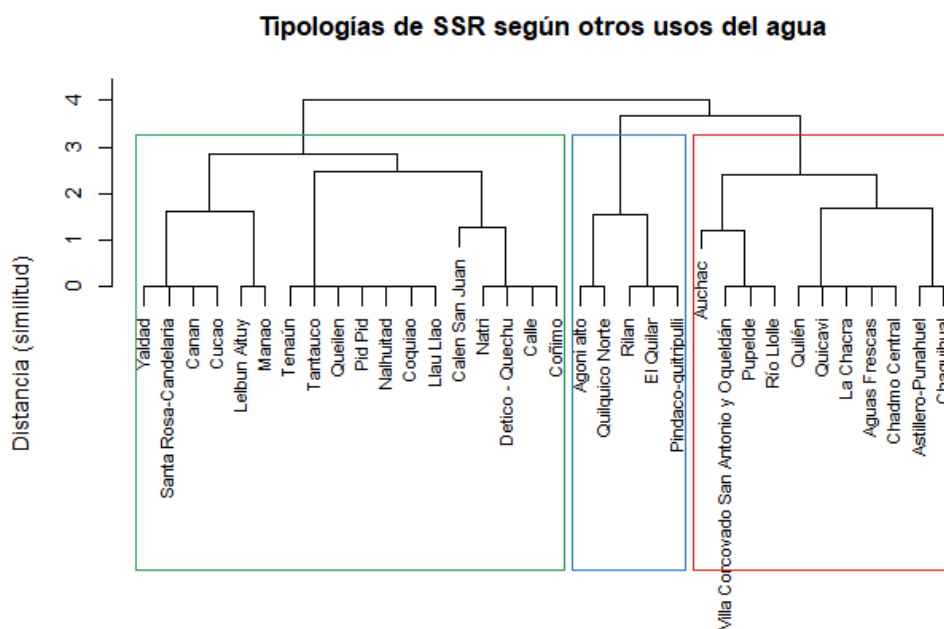


FIGURA 29: DENDROGRAMA DE CLASIFICACIÓN JERÁRQUICA DE SSR EN USOS QUE COMPITEN REPORTADOS (MÉTODO WARD.D2).

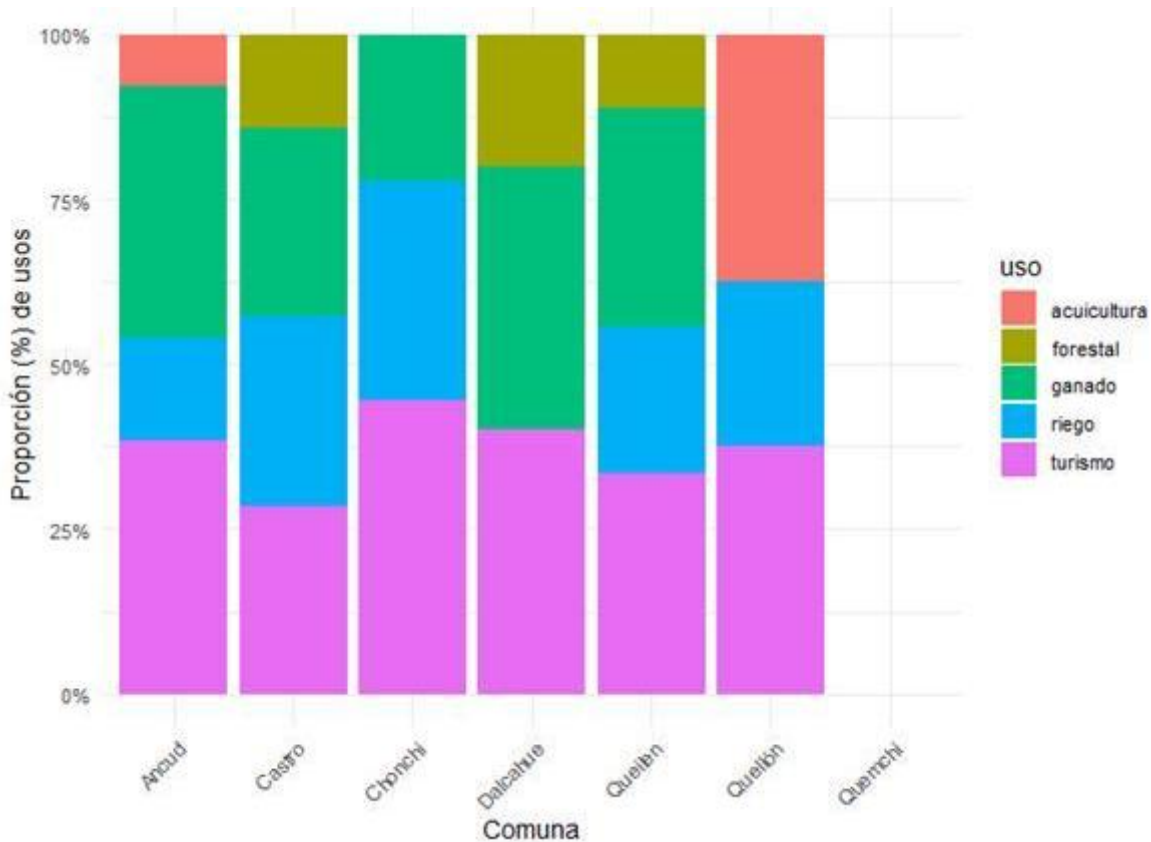


FIGURA 30: DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE USOS QUE COMPITEN POR COMUNA.

Los patrones observados en el dendrograma encuentran una correspondencia directa en la distribución de los usos del agua a nivel comunal. Mientras el agrupamiento identifica conjuntos de SSR con perfiles territoriales similares, los gráficos de barras permiten visualizar con mayor detalle cuáles son los usos predominantes en cada comuna y cómo éstos configuran escenarios diferenciados de presión sobre el recurso. Así, ambos análisis se integran para mostrar no sólo similitudes entre SSR, sino también los factores productivos comunales que sustentan esas similitudes y que ayudan a explicar diferencias en vulnerabilidad hídrica, conflictos potenciales y capacidad de planificación (*Figura 30*).

5.3. Modelos de regresión lineal múltiple

Los modelos bivariados ajustados mediante un procedimiento iterativo de minimización del AIC mostraron patrones consistentes entre los componentes del acceso.

5.3.1 Cantidad: Agua Producida

TABLA 14. TOP CINCO DE MEJOR COMBINACIÓN DE DOS VARIABLES PARA AGUA PRODUCIDA

Variable 1	Variable 2	AIC	R2
Cobertura	Frecuencia de camión aljibe	804.0	0.538
Demanda estival	Estado de la infraestructura	807.0	0.499
Cobertura	Percepción de ocurrencia de escasez	807.0	0.434
Cobertura	Estado de la infraestructura	807.0	0.497
% de pérdida de turbera	cobertura	808.0	0.419

En el caso del agua producida los resultados muestran que las variables de carácter contextuales y operacional presentan una mayor capacidad explicativa sobre esta variable dependiente que los factores climáticos o biofísicos. En particular, la cobertura refleja la magnitud del sistema en términos de usuarios o superficie abastecida; la variable frecuencia de camión aljibe indica situaciones de presión operacional asociadas a emergencias o déficits temporales; estado de la infraestructura describe la capacidad instalada y el nivel de vulnerabilidad de la infraestructura; demanda estival capta la estacionalidad y el incremento del consumo durante los meses de mayor uso; y percepción de ocurrencia de escasez representa la presión hídrica local que enfrenta cada sistema.

TABLA 15. TOP CINCO DE MEJOR COMBINACIÓN DE TRES VARIABLES PARA AGUA PRODUCIDA

Variable 1	Variable 2	Variable 3	AIC	R2
Cobertura	Frecuencia camión aljibe	Estado de la infraestructura	796	0.693
Demanda estival	Frecuencia camión aljibe	Estado de la infraestructura	798	0.675
Cobertura	Percepción de ocurrencia de escasez	Frecuencia camión aljibe	801	0.607
% de impermeabilidad	Cobertura	Frecuencia camión aljibe	801	0.605
% de impermeabilidad	Demanda estival	Frecuencia camión aljibe	802	0.591

Esta interpretación se ve reforzada por los modelos trivariados con mejor desempeño, entre los cuales destacan las combinaciones “cobertura + frec. camión aljibe + estado de la

infraestructura” (AIC = 796; R2 = 0.693) y “*demanda estival + frec. camión aljibe + estado de la infraestructura*” (AIC = 798; R2 = 0.675), que representan de manera consistente la interacción entre la magnitud del sistema, la presión operacional y la capacidad de la infraestructura. Incluso modelos alternativos, como “*cobertura + percepción de ocurrencia de escasez + frec. camión aljibe*” o “*% de impermeabilidad + cobertura + frec. camión aljibe*”, mantienen un ajuste elevado, lo que sugiere que la producción de agua es más sensible a las dinámicas de demanda, vulnerabilidad y presión sobre la red que a las condiciones biofísicas del entorno. Aunque el porcentaje de impermeabilidad constituye una variable ambiental relevante, este podría estar describiendo mayor demanda asociada a la urbanización. En conjunto, estos resultados enfatizan que los determinantes clave de la producción en los SSR se encuentran principalmente en factores operacionales, estructurales y territoriales.

5.3.1.1 Colinealidad

El análisis de colinealidad mostró patrones esperables dada la estructura de las variables socio-hidrológicas consideradas. La matriz de correlación evidenció asociaciones moderadas y altas entre varios predictores climáticos y territoriales, como días de precipitaciones intensas, humedad, días secos consecutivos, temperatura máxima y los porcentajes de cobertura de suelo, lo que refleja la relación estructural entre las condiciones climáticas y la configuración del paisaje. En contraste, la variable dependiente agua producida presentó correlaciones bajas con la mayoría de estos factores, y solo mostró asociaciones positivas moderadas con cobertura (0.59) y demanda estival (0.57), coherentes con los resultados del modelamiento (*Figura 15*).

5.3.2 Calidad: Ocurrencia de problemas de calidad

Al igual que los resultados anteriormente mostrados, el análisis de selección de predictores identificó que las variables asociadas a gestión, capacidades internas del sistema y apoyo institucional presentan una mayor capacidad explicativa sobre la ocurrencia de problemas de calidad que los factores ecológicos o biofísicos. Sin embargo, con un poder explicativo muy limitado. En los modelos bivariados, la combinación entre suma de fuentes de apoyo y potabiliza obtuvo el mejor desempeño (AIC = 32.5; pseudo R2 = 0.285), sugiriendo que el

acceso a apoyo externo y la presencia de procesos de potabilización son determinantes centrales en la reducción o presencia de eventos de calidad deficiente. En general, la suma de fuentes de apoyo aparece de manera reiterada combinada con distintos predictores, lo que confirma su relevancia transversal en el comportamiento del sistema.

TABLA 16. TOP CINCO DE MEJOR COMBINACIÓN DE DOS VARIABLES PARA PROBLEMAS DE CALIDAD

Variable 1	Variable 2	AIC	pseudoR2
Suma de fuentes de apoyo	Potabiliza	32.5	0.285
% de impermeabilidad	Suma de fuentes de apoyo	34.3	0.236
% de deforestación	Suma de fuentes de apoyo	34.4	0.234
Suma de fuentes de apoyo	Conocimiento de la norma	35.2	0.267
Conocimiento de la norma	Potabiliza	35.3	0.265

Los modelos trivariados refuerzan este patrón: la combinación *estado de la infraestructura + suma de fuentes de apoyo + potabiliza* presentó el menor AIC (30.4) y el mayor poder explicativo (pseudoR2 = 0.503), lo que indica que la calidad del agua en los SSR depende de la interacción entre la condición de la infraestructura, la existencia de capacidades y apoyos institucionales y la implementación efectiva de procesos de potabilización.

TABLA 17. TOP CINCO DE MEJOR COMBINACIÓN DE TRES VARIABLES PARA PROBLEMAS DE CALIDAD

Variable 1	Variable 2	Variable 3	AIC	pseudoR2
Estado de la infraestructura	Suma de fuentes de apoyo	Potabiliza	30.4	0.503
Suma de fuentes de apoyo	Capacidad financiera	Potabiliza	33.2	0.321
% de impermeabilidad	Suma de fuentes de apoyo	Potabiliza	33.3	0.318
Conocimiento de la norma	Potabiliza	Monitoreo	33.3	0.371
Suma de fuentes de apoyo	Conocimiento de la norma	Potabiliza	33.5	0.368

5.3.2.1 Colinealidad

La matriz de correlación muestra que las variables biofísicas presentan asociaciones estructuradas que explican en gran medida las condiciones territoriales donde se manifiestan los problemas de calidad del agua. Destaca la fuerte correlación positiva *entre % de deforestación y % de impermeabilidad (0.92)*, junto con sus correlaciones negativas con *% de bosque (-0.58 y -0.53)*, lo que indica que los territorios más deforestados y con mayor impermeabilización coinciden con una pérdida sustancial de cobertura boscosa, conformando un gradiente claro de transformación ambiental. Asimismo, *% de pérdida de perturba* se relaciona inversamente con la *% de deforestación (-0.57)* y positivamente con la presencia de bosque (0.49), lo que sugiere que la perturbación sistémica capturada por esta variable no es necesariamente equivalente a pérdida de vegetación estructural. En contraste, las variables operativas (suma de fuentes de apoyo, capacidad financiera y saneamiento) exhiben correlaciones bajas con las condiciones ambientales, lo que indica independencia relativa entre la estructura del territorio y la capacidad organizacional del SSR. Finalmente, fuente de interrupción muestra correlaciones bajas a moderadas con *% de pérdida de perturba (0.28)* y *saneamiento (0.11)*, sugiriendo que los problemas de calidad del agua responden más a una combinación de presión ambiental localizada y factores operativos específicos que a un único gradiente biofísico dominante.

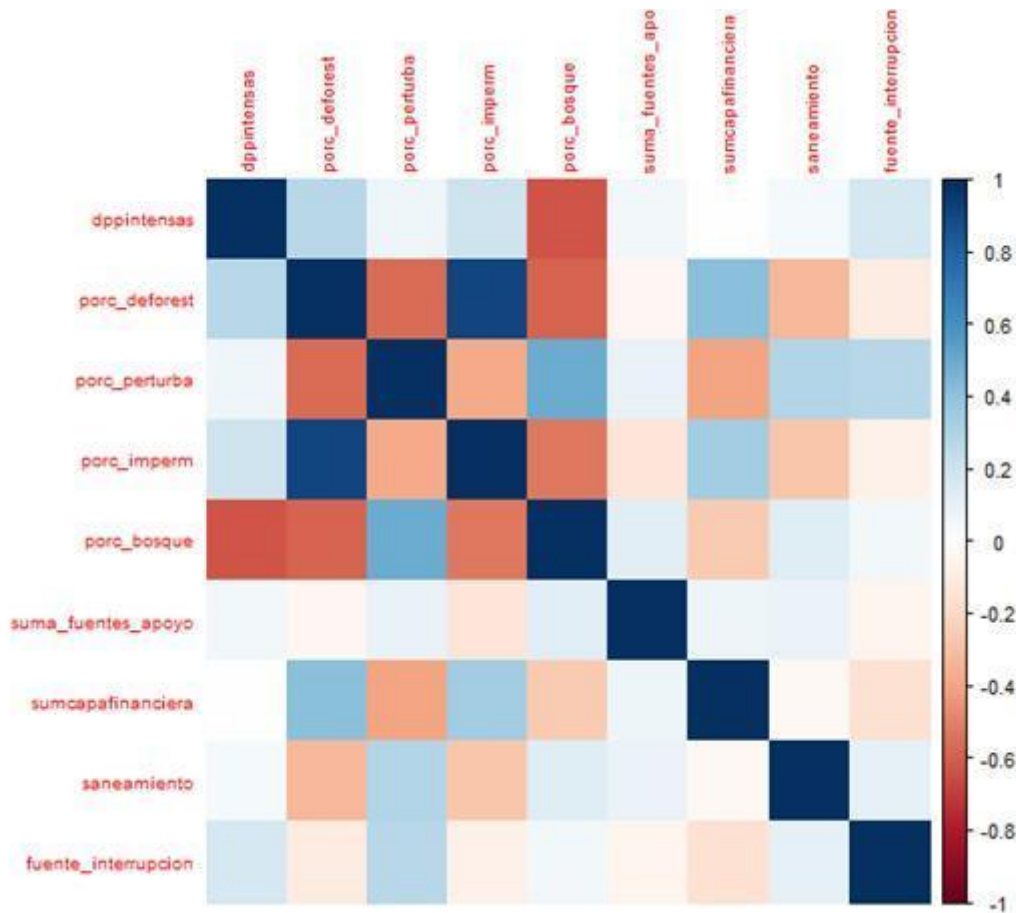


FIGURA 31. ESTRUCTURA DE CORRELACIONES ENTRE VARIABLES PREDICTORAS DE PROBLEMAS DE CALIDAD. *dpintensas*: días de precipitaciones intensas; *ppmensual*: precipitaciones media mensual; *porc_imperm*: % de impermeabilidad; *porc_bosque*: % de bosque; *porc_perturba*: % de pérdida de turbera; *porc_deforest*: % de deforestación; *suma_fuentes_apoyo*: suma de fuentes de apoyo; *sumcapafinanciera*: capacidad financiera; *saneamiento*: práctica de saneamiento y *fuenteinterrupción*: fuentes de interrupción.

Por último, en interrupciones de suministro, los modelos bivariados muestran que la variable *suma de soluciones* y *capacidad financiera* emergen de forma sistemática asociada combinada con indicadores de características del sistema (*estado de infraestructura* y *fuelle de captación*) y meteorológicos (*días de temperaturas bajo 0°C* y *frecuencia de cortes por FME*). La dupla *suma de solución + capacidad financiera* presenta el menor AIC (25.3) con un pseudoR2 de 0.53, evidenciando que la recurrencia de interrupciones se relaciona principalmente con la capacidad del sistema para gestionar contingencias operativas y con la disponibilidad de recursos financieros para responder a eventos críticos. Los modelos que incorporan adicionalmente *estado de infraestructura* o *suma de soluciones* mantienen un

desempeño sólido, reforzando la importancia estructural y operativa de estos factores en la explicación de las interrupciones.

TABLA 18. TOP CINCO DE MEJOR COMBINACIÓN DE DOS VARIABLES PARA PROBLEMAS DE CALIDAD

Variable 1	Variable 2	AIC	pseudoR2
Suma de soluciones	Capacidad financiera	25.0	0.538
Suma de soluciones	Estado de la infraestructura	31.8	0.472
Fuente de captación	Capacidad financiera	31.8	0.422
Suma de soluciones	Frecuencia de cortes por FME	31.9	0.421
Días de temperaturas bajo 0°C	Capacidad financiera	32.7	0.353

Similar a lo anterior, los modelos trivariados, la variable *suma de soluciones* adquiere un rol central, apareciendo en todas las combinaciones de mejor desempeño junto con *capacidad financiera* y distintos predictores climáticos, estructurales u organizacionales (*días secos consecutivos*, *frecuencia de cortes por FME*, *estado de infraestructura*, *frecuencia de camión aljibe*, *participación de socios en la gestión administrativa*, *usos que generan competencias y antigüedad*). La combinación *suma de soluciones* + *estado de la infraestructura* + *frecuencia de cortes por FME* alcanza un pseudoR2 de 0.756 con AIC = 24.0, mientras que otros modelos con *suma de soluciones* y *capacidad financiera* más *frecuencia de cortes por FME* o *frecuencia de camiones aljibes* mantienen valores de pseudoR2 mayores a 0.700. En conjunto, estos resultados sugieren que la ocurrencia de interrupciones depende principalmente de la capacidad financiera y organizacional para implementar soluciones frente a eventos de falla, más que de variables aisladas de presión hídrica o diseño original del sistema.

TABLA 19. TOP CINCO DE MEJOR COMBINACIÓN DE TRES VARIABLES PARA PROBLEMAS DE CALIDAD

variable 1	variable 2	variable 3	AIC	pseudoR2
Días secos consecutivos	Suma soluciones	Capacidad financiera	23.0	0.636

Suma de soluciones	Frecuencia de cortes por FME	Capacidad financiera	23.3	0.677
Suma de soluciones	Estado infraestructura	Frecuencia de cortes por FME	24.0	0.756
Suma de soluciones	Frecuencia camión aljibe	Capacidad financiera	24.3	0.702
Suma de soluciones	Participación de socios en la administración	Capacidad financiera	24.4	0.650

5.3.3.1 Colinealidad

La matriz de correlación evidencia relaciones en general bajas entre las variables utilizadas, lo que sugiere que cada predictor aporta información relativamente independiente al análisis de interrupciones. Las variables climáticas y de presión hídrica (*días de precipitaciones inntensas, promedio de precipitaciones mensual, días secos consecutivos*) presentan correlaciones moderadas entre sí, por ejemplo, *días de precipitaciones intensas* y *días secos consecutivos* (0.74) y *días de precipitaciones intensas* y *promedio de precipitaciones mensual* (0.62)— lo que refleja su coherencia interna como indicadores del régimen de precipitaciones, mientras que su asociación con variables operativas es mínima. En contraste, los indicadores de gestión y capacidad (*suma de solución, usos que generan competencia, capacidad financiera, suma de fuentes de apoyo*) exhiben correlaciones bajas entre sí y con el resto de los predictores, destacando la independencia de estos componentes institucionales respecto de las condiciones ambientales. Solo se observan correlaciones moderadas en torno a *fuentes de interrupción*, especialmente con *suma de soluciones* (0.35), *usos que generan competencia* (0.29) y *Eventos de FME que generan cortes* (0.31), lo que sugiere que la ocurrencia de interrupciones reconoce cierto alineamiento con la presencia simultánea de soluciones implementadas y medidas de emergencia. En conjunto, los resultados confirman que no existen agrupamientos fuertes entre variables, lo que favorece su uso concurrente en modelos predictivos sin riesgo de redundancia estructural.

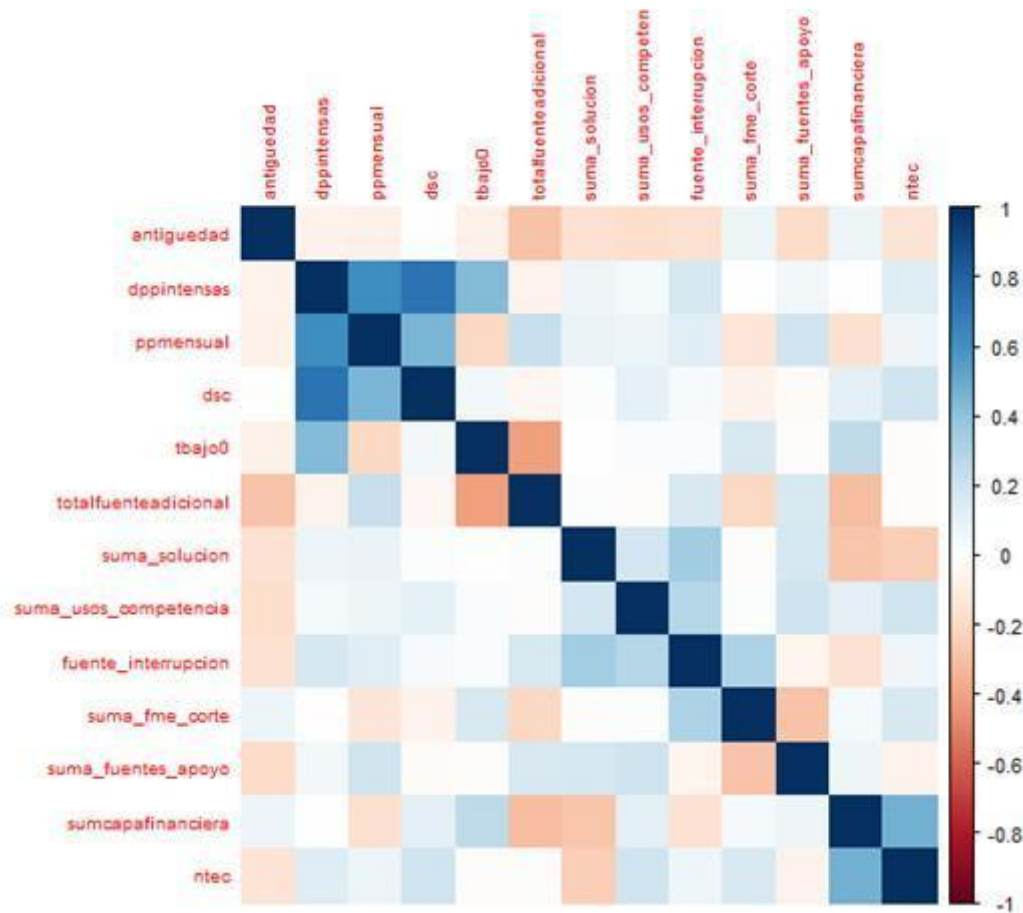


FIGURA 32. ESTRUCTURA DE CORRELACIONES ENTRE VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA Y VARIABLES CONTINUAS. *ANTIGÜEDAD*: ANTIGÜEDAD DE SSR; *dppintensas*: días de precipitaciones intensas; *ppmensual*: precipitaciones media mensual; *dsc*: días secos consecutivos; *tbajo0*: días de temperaturas bajo 0°C; *totalfuenteadicional*: total de fuentes adicionales; *suma_solucion*: suma de soluciones ante cortes de suministro; *suma_usos_competencia*: sumas de usos quecompiten; *fuentes_interrupcion*: fuentes de interrupción; *suma_fme_corte*: suma FME que genera cortes; *porc_imperm*: % de impermeabilidad; *sinacceso*: personas sin acceso; *demandaestival*: demanda estival; *porc_bosque*: % de bosque; *porc_perturba*: % de pérdida de turbera; *suma_usos_competencia*: usos que compiten ; *suma_fuentes_apoyo*: suma de fuentes de apoyo; *sumcapafinanciera*: capacidad financiera y *ntec*: numero de tecnologías.

6. DISCUSIÓN

El modelo socio-hidrológico de acceso al agua propuesto, plantea que los procesos biofísicos (régimen de precipitaciones, cobertura de suelo, degradación e infraestructura ecológica) se entrelazan con los arreglos institucionales, las capacidades organizacionales y las decisiones de gestión cotidiana (infraestructura, financiamiento, apoyo externo, gestión comunitaria, potabilización y uso de tecnologías). Esta articulación refleja la naturaleza integrada y anidada del sistema que determina los componentes clave del acceso al agua, los cuales no depende de un único componente, sino de la interacción de los subsistemas biofísicos y socio-institucionales que modulan la cantidad, la calidad y la continuidad del suministro. En concordancia, el estudio de Carr et al. (2021) sostiene que la gestión del agua ya no puede pensarse únicamente como un problema físico-ambiental, sino también como un desafío social, político y de justicia. Para demostrarlo, emplea el enfoque socio-hidrológico para identificar e integrar factores determinantes de la gestión hídrica sostenible mediante modelos conceptuales y aplicados que combinan variables físicas, sociales e institucionales. Este antecedente refuerza la pertinencia del modelo construido en esta tesis y valida su potencial como herramienta analítica y dar orientación a la gobernanza del acceso al agua potable.

Sobre la base de este enfoque, los resultados del análisis exploratorio y de los modelos de regresión lineal bi y tri variados entregan evidencia de relaciones moderadas y fuertes, coherentes con la estructura del modelo socio-hidrológico del acceso al agua potable. En particular, la producción de agua muestra correlaciones significativas con variables territoriales como cobertura ($\rho = 0.572$) y demanda estival ($\rho = 0.487$), mientras que la degradación ambiental se expresa en la relación negativa con % de pérdida de turbera ($\rho = -0.537$), confirmando que los subsistemas ecológicos condicionan la disponibilidad física del recurso. Adicionalmente, aquellos servicios con una mejor infraestructura mostraron una media de producción de agua mayor en comparación al resto de los grupos. En materia de calidad, se observan efectos grandes en las diferencias estandarizadas de medias para variables descriptivas de la cobertura de suelo ($d \approx 0.57-0.90$), suma de fuentes de apoyo ($d > 1.0$) y capacidad financiera ($d = 0.79$), lo que sugiere que tanto la perturbación territorial como la dependencia de apoyos externos y la capacidad de financiamiento influyen de

manera determinante en el deterioro o la mejora de la calidad del agua. Respecto de la continuidad del suministro, los análisis no paramétricos evidencian diferencias significativas para capacidad financiera ($H = 13.47$, $p = 0.001$) y suma de soluciones ($H = 9.69$, $p = 0.008$), ambas con tamaños de efecto altos ($\varepsilon^2 > 0.29$), mientras que las SMD confirman efectos grandes a muy grandes ($d > 1.4$ en varias comparaciones). Complementariamente, el estado de infraestructura muestra asociación significativa (Fisher $p = 0.032$).

En cuanto a los modelos de regresión el mejor desempeño profundiza la lectura anterior e incorporan sistemáticamente la cobertura y presión del sistema, las capacidades operacionales y financieras, y la condición de la infraestructura, y en algunos casos indicadores de eventos extremos (FME), lo que sugiere que la continuidad depende principalmente de la capacidad del sistema para responder a contingencias y sostener su operación frente a perturbaciones tanto internas como externas. En agua producida, los mejores modelos incorporan *cobertura + frec. camión aljibe + estado de infraestructura* alcanzan $R^2 = 0.693$; en problemas de calidad, la tríada estado de infraestructura + suma de fuentes de apoyo + potabiliza explica la mitad de la variabilidad (pseud $R^2 = 0.503$); para interrupciones, los modelos con suma de soluciones + capacidad financiera + frecuencia de cortes por FME logran pseud R^2 superiores a 0.70, confirmando la relevancia de las capacidades organizacionales para sostener el acceso. En conjunto, estas relaciones cuantitativas ratifican la solidez respecto de dichos predictores en el modelo socio-hidrológico propuesto. No obstante, es necesario seguir avanzando en la conformación de una muestra con mayor poder estadístico para la validación de otras relaciones. Las cuales en esta ocasión no fueron estadísticamente demostrables, ya que un amplio número de variables predictoras sobre parametrizar la muestra analizada.

Desde esta evidencia empírica, el análisis trasciende la validación estadística del modelo y abre la discusión sobre el peso relativo de estos factores en la toma de decisiones y en el diseño de políticas públicas orientadas a mejorar el acceso al agua potable en contextos rurales. Es importante continuar evaluando el peso relativo y las interacciones entre las variables que influyen en el acceso al agua, con el fin de orientar a los tomadores de decisiones respecto de cómo las medidas futuras pueden impactar la provisión hídrica. Los diagnósticos nacionales de la situación hídrica, indican que las limitaciones del acceso al

agua potable en el territorio se explican principalmente por dimensiones de gestión, organización y gobernanza, más que por una disminución absoluta de la oferta hídrica. Sin embargo, la configuración climática y geográfica de Chiloé, marcada por la dependencia de la lluvia y la ausencia de almacenamiento nival, introduce una fragilidad estructural que amplifica los efectos de decisiones de gestión deficientes o tardías. Estas conclusiones se alinean con Frene (2022), quien demuestra que el acceso seguro y continuo al agua depende directamente de la gestión de los ecosistemas hídricos. Según el autor, prácticas productivas inadecuadas, degradación del bosque nativo y ausencia de planificación integrada deterioran la capacidad de retención y la calidad del agua, lo que vuelve esencial la ordenación de la microcuenca y la gestión participativa del territorio. Su propuesta de articulación entre comunidad, Estado y conocimiento científico-técnico sugiere que la adopción de soluciones socialmente aceptadas, ecológicamente viables y de bajo costo, fortalece la resiliencia local frente a la percepción de ocurrencia de escasez. En este marco, los resultados de Frene (2022) refuerzan la comprensión de los SSR como sistemas socio ecológicos en donde los componentes ecológicos y sociales evolucionan y se retroalimentan, como por ejemplo: i) las modificaciones humanas en el territorio que causan degradación de funciones hídricas de los ecosistemas, en consecuencia, alterando el acceso al agua, al intervenir procesos como la infiltración, la evaporación y la escorrentía, entre otros.

Por otro lado, ii) las comunidades con mayor capacidad organizacional y mejor articulación institucional logran amortiguar de manera más efectiva las restricciones biofísicas y climáticas, mientras que aquellas con menores recursos técnicos y organizativos quedan más expuestas a interrupciones, deterioro de la calidad y respuestas reactivas como el uso recurrente de camiones aljibe. En esta línea, y como ocurre en Chiloé, la estacionalidad de la demanda exacerba la fragilidad de los SSR en un territorio cuyo régimen hidrológico carece de almacenamiento nival y depende de la reposición constante de la lluvia. Desde la perspectiva socio hidrológica, este fenómeno constituye una retroalimentación típica: más demanda, mayor presión sobre el sistema, mayores probabilidades de agotamiento de fuente o fallas, reduciendo la resiliencia del servicio, lo que se ajusta a la alta correlación entre agua producida y demanda estival ($\rho = 0.487$).

Los resultados de esta tesis muestran que los predictores ecológicos, como cobertura de suelo, deforestación, impermeabilización o variables climáticas, presentan una capacidad explicativa menor en comparación con los factores operacionales y de demanda. La menor capacidad explicativa de los predictores ecológicos no se debe a irrelevancia biogeofísica, sino a un problema de escala analítica. Lo que se atribuye a una falta de disponibilidad de datos puntuales. Al asignar cobertura de suelo y variables climáticas a nivel comunal, se suavizan las variaciones microterritoriales que determinan la disponibilidad efectiva de agua en captaciones puntuales. En este sentido, aunque las correlaciones ambientales son en general bajas o no significativas, el análisis exploratorio revela señales coherentes: los SSR ubicados en zonas con mayor perturbación del paisaje, como la pérdida de turberas o el aumento de superficies impermeables, tienden a registrar menor estabilidad en la producción y calidad del agua, lo que coincide con la asociación negativa observada entre *% de pérdida de turbera* y agua producida, así como con su fuerte efecto en los problemas de calidad. A la inversa, territorios con remanentes de bosque nativo o presencia de humedales muestran tendencias hacia una mayor robustez hídrica, reflejada en la menor dispersión de problemas de calidad. Lo anterior no quiere decir que la evidencia indique que la degradación del paisaje explica por sí sola la variabilidad entre sistemas, pero sí forma parte del contexto territorial que amortigua la disponibilidad. Estos patrones son consistentes con la literatura socio ecológica que identifica a la infraestructura ecológica, bosques, turberas, humedales, como un modulador clave de la regulación hídrica (Cueto et al., 2025; Esse et al., 2021; Adler et al., 2017; Alvarez-Garretón et al., 2021; Vásquez et al., 2021; Akhtar et al., 2021 y Zucchetti et al., 2020) especialmente en territorios insulares donde las fuentes son acotadas y sensibles a la presión antrópica.

La interpretación de los resultados asociados al *% de pérdida de turbera* y las variables de cobertura de uso de suelo, se ven fortalecidas por los antecedentes ecohidrológicos documentados para Chiloe. En particular, Arriaza (2020) muestra que las turberas de Quemchi actúan como reservorios hídricos dentro de la microcuenca, regulando la escorrentía superficial y subsuperficial, y aportando a la estabilidad hídrica mediante procesos como la retención de agua, la infiltración horizontal y el almacenamiento de sedimentos. Sin embargo, el estudio evidencia que estas funciones son fuertemente sensibles a las presiones antrópicas, especialmente la explotación del pompón (*Sphagnum*), la

deforestación y el reemplazo por praderas y matorrales, que alteran la estructura del de acumulación de la turba⁴ y reducen la capacidad ecosistémica de regulación hídrica. Asimismo, la disminución del bosque nativo, identificado por Arriaza como un componente clave en la regulación hídrica, se refleja en los patrones de degradación observados en los servicios estudiados, donde la pérdida de cobertura arbórea se traduce en menor resiliencia hidrológica. En conjunto, estos antecedentes permiten interpretar *% de pérdida de turbera* y *% de impermeabilidad* no solo como una medida de actividad humana, sino como un indicador funcional del deterioro de la infraestructura ecológica que sostiene la seguridad hídrica local.

La evidencia ecohidrológica revisada, muestra que la degradación del paisaje afecta directamente la estabilidad hídrica de las microcuencas. Sin embargo, esta dimensión biofísica no opera de manera aislada: sus efectos se ven amplificados o atenuados según las capacidades locales de gestión y el arreglo institucional que estructura la gobernanza del agua. En este sentido, el modelo de acceso al agua potable desarrollado en este estudio coincide con la literatura reciente en señalar que los SSR funcionan dentro de un entramado socio territorial donde la escala local adquiere un papel decisivo.

El modelo de acceso al agua potable para SSR en este estudio enfatiza el componente local de la gestión hídrica. En esta línea, los hallazgos de Delgado et al. (2021) permiten profundizar la comprensión de los factores que condicionan la gobernanza hídrica en Chiloé y complementan las conclusiones propuestas por Frêne et al. (2022), respecto a la aplicación de modelos de intervención territorial orientados a la resiliencia de las microcuencas. En primer lugar, ambos trabajos evidencian que la gestión del agua en la isla se desarrolla sin una perspectiva de cuenca, lo que genera procesos fragmentados y una débil articulación entre actores locales e institucionales. Asimismo, la predominancia de un enfoque jerárquico y tecnocrático, expresado en la centralidad del Código de Aguas y en la actuación vertical del Estado, impide la construcción de soluciones contextualizadas, coherentes con las dinámicas sociales y ecológicas de las microcuencas. Esta desconexión se refleja en la ausencia de mecanismos de retroalimentación entre los niveles local y regional, evidenciada

⁴ Acrotelmo: Capa superficial de la turba hidrológicamente activa, en dónde radica mayoritariamente la función de regulación hídrica y se acumula vegetación hidrófila, es. la capa (Díaz et al. 2015)

en el modelo de gobernanza en cascada, donde los problemas y aprendizajes territoriales no alcanzan a incidir en la toma de decisiones. A esto se suma la constatación de que la calidad del ecosistema condiciona las formas de organización social: en cuencas más intervenidas se observa una mayor estructuración organizacional, mientras que en cuencas menos alteradas predominan usos individuales del agua, lo que refuerza la necesidad de incorporar el estado ecológico como dimensión central de la gobernanza, sin esperar colapsos de sistema. Finalmente, los autores subrayan que la participación comunitaria, aunque indispensable, requiere ser fortalecida mediante procesos de empoderamiento y acceso a información, superando las limitaciones actuales de baja incidencia y escasa coordinación interinstitucional. En conjunto, estos elementos respaldan la importancia de avanzar hacia un enfoque transdisciplinario y multiescalar de gobernanza, donde la microcuenca se constituya en la unidad estratégica para integrar conservación ecológica, organización social y articulación institucional, tal como propone el modelo de intervención territorial orientado a la resiliencia planteado por Frêne et al. (2022).

En contraste con estos hallazgos, veintiún de los treinta y cuatro SSR de la muestra (61,7%) declararon colaborar con otros comités para resolver problemáticas, compartir información o participar en asociaciones comunales de la isla, lo que sugiere una evolución en las prácticas de coordinación local. Sin embargo, persiste una baja participación del resto de la comunidad que integra los comités, situación que recae en una sobrecarga para las directivas y genera una desconexión entre socios en los procesos de gestión hídrica, debilitando los fundamentos colaborativos y comunitarios de estas organizaciones.

Adicionalmente, aunque la estructura jerárquica y tecnocrática del Estado ha comenzado a modificarse, particularmente con la creación de unidades del agua en los municipios y de unidades territoriales provinciales en la Subsecretaría de Servicios Sanitarios Rurales, la capacidad de respuesta y continuidad de las acciones de estas unidades es un obstáculo para la gestión. Ocho de los treinta y cuatro SSR (23,5%) manifestaron percibir que no cuentan con apoyo suficiente de estas instancias, evidenciando una limitada capacidad de respuesta institucional, principalmente asociada a la falta de personal en los niveles locales, según indicaron los entrevistados.

Estas dinámicas de colaboración parcial, participación limitada y apoyo institucional insuficiente no solo reflejan tensiones internas de los SSR, sino que también revelan la estructura sistémica que condiciona su desempeño en la provisión de suministro hídrico. En este sentido, los resultados del estudio pueden interpretarse de manera más amplia a la luz del marco conceptual reciente sobre seguridad hídrica rural, el cual ofrece un lente integrador para comprender cómo interactúan los factores ecológicos, sociotécnicos, financieros e institucionales que configuran la capacidad de los SSR para asegurar cantidad, calidad y continuidad del servicio.

Por otro lado, los hallazgos obtenidos en el análisis de los SSR en Chiloé muestran una correspondencia clara con el marco conceptual propuesto por Nicolas-Artero y Blanco (2024), quienes estructuran la seguridad hídrica rural en torno a siete indicadores hidrosociales. Estos abarcan procesos de acceso en cantidad y gestión sociotécnica para asegurar la disponibilidad y la calidad del recurso, la solidez económico-financiera y, finalmente, los procesos colaborativos vinculados al apoyo y al fortalecimiento institucional y de conocimientos.

Estos indicadores se relacionan directamente con las variables analizadas en este estudio, en función de las tres variables dependientes: agua producida, problemas de calidad e interrupción del suministro, que corresponde a los procesos estructurantes de la seguridad hídrica: cantidad, calidad y continuidad. La arquitectura conceptual de los Indicadores compuestos de seguridad hídrica, propuestos por los autores, confirma que estos procesos emergen de la interacción entre infraestructura, capacidades organizacionales, financiamiento, apoyo institucional y condiciones territoriales. Esta estructura concuerda de manera robusta con el conjunto de predictores que mostraron mayor poder explicativo en nuestros modelos (cobertura, demanda estival, potabilización, estado de infraestructura, fuentes de interrupción) y con los patrones detectados en el EDA, donde la degradación del paisaje, las prácticas de SBN, capacidad financiera, entre otros descriptores del sistema ejerce un efecto mediado por las capacidades internas de cada sistema,

Asimismo, al contrastar los indicadores socio-técnicos y económicos del estudio de Nicolas-Artero con nuestras variables explicativas, se observa una convergencia notable. Variables como capacidad financiera, fuente de apoyo, suma de soluciones implementadas se alinean

precisamente con los indicadores de “solidez económica”, “conocimientos” y “redes de apoyo”, los cuales la autora identifica como críticos para la estabilidad del servicio y la capacidad de respuesta ante contingencias. Del mismo modo, estado de infraestructura, fuentes de interrupción coinciden con los indicadores de “gestión sociotécnica” para asegurar calidad y continuidad del suministro.

Los modelos bi y tri-variables refuerzan esta estructura: las interrupciones del suministro están asociadas principalmente a capacidad financiera y a la suma de soluciones, mientras que los problemas de calidad se relacionan con potabilización y apoyo, coherentes con los indicadores secundarios “sistemas socio técnico para la calidad de agua e “conocimiento y redes de apoyo” Finalmente, en el caso del agua producida, variables como cobertura y demanda estival reflejan la magnitud operacional del sistema, en línea con el indicado secundario “fuente de agua” y “sistemas socio técnico de cantidad”. En conjunto, esta convergencia demuestra que la evidencia de este estudio no solo es coherentes con el marco socio-hidrológico del autor, sino que revela cómo los sistemas con mayor fortaleza organizacional económica y socio técnica logran compensar las limitaciones territoriales, alcanzando mejores niveles de cantidad, calidad y continuidad del servicio.

El enfoque socio-hidrológico aplicado en este estudio permitió representar interacciones clave entre componentes ecológicos, institucionales y operacionales; sin embargo, presenta limitaciones propias de todo proceso de modelación. La heterogeneidad social y ecológica del territorio no puede ser capturada en su totalidad, ciertos procesos no lineales o emergentes pueden quedar subrepresentados, y la parametrización de variables sociales incorpora niveles inevitables de incertidumbre. Además, el equilibrio entre realismo, generalidad y precisión, descrito por Levins (1966), restringe la aplicabilidad universal del modelo (De Langhe, 2019). Aun así, el enfoque desarrollado cumple su propósito explicativo y exploratorio, ofreciendo una estructura conceptual útil para interpretar los resultados y orientar decisiones de gestión pública.

El alcance del estudio estuvo condicionado por restricciones metodológicas y de disponibilidad de información que deben ser consideradas al interpretar los resultados. El levantamiento de datos se concentró en un periodo acotado, lo que impide capturar la variabilidad estacional y ciertos eventos críticos que influyen en la disponibilidad, calidad y

continuidad del agua. Asimismo, el tamaño muestral superior al 30% del total de SSR dentro de la Isla grande de Chiloé, no permitió la aplicación de modelos estadísticos más complejos y la identificación de interacciones no lineales entre variables. A esto se suma la escala de los datos ecológicos disponibles, mayoritariamente comunales, que dificulta caracterizar con precisión las condiciones ambientales específicas de cada microcuenca o captación. Estas restricciones son comunes en estudios sociohidrológicos en territorios rurales, donde la infraestructura de monitoreo es escasa y la información ambiental presenta niveles importantes de incertidumbre.

Para superar estas limitaciones se requiere avanzar hacia un diseño metodológico más robusto, con mediciones ambientales de mayor resolución espacial, series temporales extendidas y un tamaño muestral más amplio que permita aplicar modelos multivariados y explorar dinámicas no lineales entre variables ecológicas, organizacionales e institucionales. Asimismo, el fortalecimiento del monitoreo hidrológico descriptivos de los SSR, como precisión de la demanda, medición de la extracción de agua desde las fuentes de captación, seguimiento de caudales y niveles freáticos, estado de humedales, entre otros, permitiría validar las relaciones inferidas y mejorar la capacidad predictiva del modelo sociohidrológico. La incorporación de métodos mixtos y herramientas de modelación avanzada, como modelos basados en agentes o sistemas dinámicos, ampliaría la comprensión de los umbrales de resiliencia de los SSR y ofrecería bases más sólidas para orientar intervenciones territoriales y políticas públicas adaptativas.

7. CONCLUSIONES

Los análisis revelan que las variables operacionales y organizacionales, como cobertura, demanda estival, estado de infraestructura, capacidad financiera, potabilización y apoyo institucional, son las que mejor explican las variaciones en producción, calidad e interrupciones, mientras que la degradación del paisaje actúa como un modulador del acceso, amplificando vulnerabilidades en sistemas con menor capacidad interna. Estas dinámicas permiten distinguir tipologías de riesgo diferenciadas entre sistemas, en las que convergen

presiones territoriales, fallas técnicas y limitaciones estructurales de oferta hídrica dentro de un marco institucional aún en consolidación.

El modelo socio hidrológico desarrollado reveló y logró representar la estructura anidada de los procesos involucrados en el acceso de agua potable en zonas rurales, el cual no dependen de un componente aislado, sino de la combinación y retroalimentación entre procesos biofísicos y capacidades sociotécnicas.

En síntesis, la cantidad se estructura principalmente por la cobertura/demanda y condiciones territoriales; la calidad refleja interacciones entre prácticas/infraestructura y perturbación del territorio; y la continuidad aparece dominada por capacidades financieras y de respuesta operativa, con el clima actuando más como perturbación (FME) que como predictor lineal continuo.

En consecuencia, la evidencia sugiere que las estrategias para fortalecer la disponibilidad y continuidad del servicio en los SSR deben priorizar intervenciones directas sobre la capacidad operativa, como aumentar el almacenamiento, reducir pérdidas, mejorar la infraestructura y gestionar la demanda, complementadas con una planificación territorial que reconozca la presión demográfica y productiva sobre los ecosistemas que sostienen el ciclo hidrológico.

En conjunto, los SSR se configuran como sistemas socio-ecológicos complejos, cuyo desempeño depende tanto de la infraestructura ecológica como del fortalecimiento de la gestión local. Este estudio aporta un modelo capaz de describir estas interdependencias y de orientar procesos de gobernanza hídrica más coherentes con la heterogeneidad del territorio y con la adaptación de la Ley 20.998 a las capacidades reales de los sistemas rurales. Finalmente, se destaca la necesidad de robustecer la base analítica del modelo, avanzando hacia una muestra más amplia, datos de mayor resolución y metodologías más integradas que permitan capturar mejor la variabilidad socio-ecológica y apoyar decisiones que fortalezcan la resiliencia hídrica en escenarios de creciente incertidumbre climática.

Los resultados de esta investigación demuestran que el acceso al agua potable en los Servicios Sanitarios Rurales (SSR) de la Isla Grande de Chiloé es de interacciones complejas

entre factores ecológicos, institucionales, operacionales y comunitarios, lo que permitió cumplir con los objetivos propuestos.

8. REFERENCIAS

- Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Bhawani, S. A., & Umar, K. (2021). Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water*, 13(19), 2660.
- Alvarez-Garretón, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 429-446.
- Anderson, M. G., Avissar, R., Bear, J., Beven, K., Blöschl, G., Bouten, W., & Wood, E. (2005). *Encyclopedia of hydrological sciences*. John Wiley & Sons.
- Arriaza Mancini, C. I. (2020). Desarrollo de un modelo conceptual ecohidrológico para una red de turberas en Quemchi (Chiloé). Seminario de Título para optar al Título de Biólogo con mención en medio Ambiente. Universidad de Chile.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2002). *Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century*.
- Berkes, F., & Folke, C. (1998). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*, 1(4), 4.
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2000). Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological applications*, 10(5), 1251-1262.
- Blanco, J.A. 2013. Modelos ecológicos: descripción, explicación y predicción. *Ecosistemas* 22:3, pp.1-5.
- Blanco, E., & Donoso, G. (2016). Agua potable rural: desafíos para la provisión sustentable del recurso. *Actas de Derecho de Aguas*, 6, 63-79.
- Cariola, E. C., & Alegría, M. A. (2004). Análisis del proceso de privatización de los sistemas de agua potable y saneamiento urbanos en Chile. *Rega*, 1(2)), 65-85.
- Carr, G., Barendrecht, M. H., Balana, B. B. y Debevec, L. (2022). Explorando la gestión de la calidad del agua con un modelo sociohidrológico: un estudio de caso de Burkina Faso. *Revista de Ciencias Hidrológicas*, 67(6), 831–846. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.2020276>.
- Cardozo, M.O., Rúa, A.M. L., & Alzate, Ó. E. 2013. Evolución de los modelos explicativos de fagocitosis en estudiantes universitarios. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (Colombia)*, 9:1, pp. 79-106.
- Cariola, E. C., & Alegría, M. A. (2004). Análisis del proceso de privatización de los sistemas de agua potable y saneamiento urbanos en Chile. *Rega*, 1(2)), 65-85.

- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2021). *Cartografía temática de cambio de uso de la tierra 2001–2021 (escala 1:50.000)*. MapBiomias Chile. <https://chile.mapbiomas.org/mapas-de-referencia/>
- Conway, D., Persechino, A., Ardoin-Bardin, S., Hamandawana, H., Dieulin, C., & Mahé, G. (2009). Rainfall and water resources variability in sub-Saharan Africa during the twentieth century. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1), 41–59.
- Costanza, R., & Jorgensen, S.E. (Eds.). 2002. *Understanding and solving environmental problems in the 21st century toward a new, integrated hard problem science*. Elsevier.
- Cueto, D. A., Alaniz, A. J., Hidalgo-Corrotea, C., Vergara, P. M., Carvajal, M. A., & Barrios-Saravia, A. (2025). Chilean Mediterranean forest on the verge of collapse? Evidence from a comprehensive risk analysis. *Science of The Total Environment*, 964, 178557.
- Dai, T., Shao, D. G., & Huang, X. F. (2007). Research on space-time variability of water resources based on chaos theory. *Engineering Journal of Wuhan University*, 40(5), 15–19.
- De la Cuadra, F. (2013). Cambio climático y conflicto socioambiental: Apuntes sobre el antagonismo entre el pueblo Mapuche, el Estado chileno y las empresas. En *Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas: Una vinculación necesaria* (pp. 217–238). Santiago de Chile: CLACSO.
- Delgado, L. E., De Ríos, R., Perevochtchikova, M., Marín, I. A., Fuster, R., & Marín, V. H. (2021). Water governance in rural communities of Chiloé Island, southern Chile: a multi-level analysis. *Journal of Rural Studies*, 83, 236-245.
- De Langhe, R. (2019). Virtudes científicas en la construcción de modelos: el equilibrio entre generalidad, realismo y precisión. Un análisis riguroso del triple equilibrio de Levins.
- Diaz, M. F., Silva, W., & León, C. A. (2015). Características de los ecosistemas de turberas, factores que influyen en su formación y tipos. *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes*, 27-39.
- Donoso, G., Calderón, C., & Silva, M. (2015). Informe final de evaluación infraestructura hidráulica de agua potable rural (APR). *Santiago: Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas*.
- Dossey, L. (1982). *Space, Time, and Medicine: Foreword by Fritjof Capra*. Shambhala Publications.
- Duarte-Vera, A. E., Vanhulst, J., & Letelier Araya, E. A. (2021). Tensiones de la gobernanza comunitaria de servicios sanitarios rurales en territorios perirurbanos (Chile). *Urbano*, 24(44), 112–121. <https://doi.org/10.22320/07183607.2021.24.44.09>
- Ehtasham, L., Sherani, S. H., & Nawaz, F. (2024). Aceleración del ciclo hidrológico y su impacto en la disponibilidad de agua sobre la tierra: Un efecto adverso del cambio climático. *Meteorología, Hidrología y Gestión del Agua*.

- Esse, C., Rios, N., Saavedra, P., Fonseca, D., Encina-Montoya, F., Santander-Massa, R., ... & Correa-Araneda, F. (2021). Effects of land use change on water availability and water efficiency in the temperate basins of south-central Chile. *Journal of King Saud University-Science*, 33(8), 101650.
- Frêne, C., Villarroel, F., Rojas, R., Sanzana, J., González, J., Alarcón, D., ... & Barra, S. (2022). Escasez de agua en Chiloé: Red Participativa de Agua como solución para el sector rural. *Revista de Geografía Norte Grande*, (82), 375-396.
- Frota, R. L., Souza Filho, F. D. A., Barros, L. S., Silva, S. M. O., Porto, V. C., & Rocha, R. V. (2021). “Network” socio-hydrology: a case study of causal factors that shape the Jaguaribe River Basin, Ceará-Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 66(6), 935-950.
- Fundación Amulén. (2019). Pobres de agua. Radiografía del agua potable rural en Chile: Visualización de un problema oculto. *Centro UC*.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4, 1–23.
- Holling, C. S., & Gunderson, L. H. (2002). Resilience and adaptive cycles.
- Holling, C.S. 2001. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*. 4, pp. 390-405.
- Hjorth, P., & Bagheri, A. (2006). Navigating towards sustainable development: A system dynamics approach. *Futures*, 38(1), 74-92.
- Jahn, T., Becker, E., Keil, F., & Schramm, E. 2009. Understanding social-ecological systems: frontier research for sustainable development. Implications for European Research Policy. Institute for Social-Ecological Research (ISOE), Frankfurt/Main.
- Janssen, M. A., & Ostrom, E. (2006). Governing social-ecological systems. *Handbook of computational economics*, 2, 1465-1509.
- Javanbakht-Sheikhahmad, F., Rostami, F., Azadi, H., Veisi, H., Amiri, F., & Witlox, F. (2024). Agricultural water resource management in the socio-hydrology: A framework for using system dynamics simulation. *Water Resources Management*, 38(8), 2753-2772.
- Jopp F, Reuter H, Breckling B. 2011. Modelling complex ecological dynamics. An introduction to ecological modelling. Springer Verlag, Berlín. 397 p.
- Jørgensen, S. E., & Fath, B. D. (2011). Concepts of modelling. *Developments in Environmental Modelling*, 23, 19-93.
- Kumar, P., Avtar, R., Dasgupta, R., Johnson, B. A., Mukherjee, A., Ahsan, M. N., & Mishra, B. K. (2021). Socio-hydrology: A key approach for adaptation to water scarcity and achieving human well-being in large riverine islands. *Progress in Disaster Science*, 8, 100134.
- *Laboratorio de Análisis Territorial (LAT) de la Universidad de Chile*. (2016). Estado del arte y desafíos de los Servicios Sanitarios Rurales.
- Levins, Richard (1966), ‘The Strategy of Model Building in Population Biology’, *American Scientist*, 54, pp. 421-31.

- Lillo-Saavedra, M., Velásquez-Cisterna, P., García-Pedrero, Á., Salgado-Vargas, M., Rivera, D., Cisterna-Roa, V., ... & Gonzalo-Martín, C. (2024). Socio-Hydrological Agent-Based Modeling as a Framework for Analyzing Conflicts within Water User Organizations. *Water*, 16(22), 3321.
- Liu, H., Benoit, G., Liu, T., Liu, Y., & Guo, H. (2015). An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale. *Journal of environmental management*, 155, 11-23.
- Melsen, LA, Vos, J., & Boelens, R. (2018). ¿Cuál es el papel del modelo en la sociohidrología? Discusión de “Predicción en un mundo sociohidrológico”. *Revista de Ciencias Hidrológicas*, 63 (9), 1435-1443.
- Matthewson, J., & Weisberg, M. (2009). The structure of tradeoffs in model building. *Synthese*, 170(1), 169-190.
- Ministerio de Obras Públicas. 1989. Decreto con Fuerza de Ley N°382: “Ley general de servicios sanitarios. Diario oficial. Disponible en línea: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5545>.
- Nicolas-Artero, C., & Blanco, G. (2024). Propuesta de un indicador para estudiar la seguridad hídrica en la interfaz doméstica-comunitaria de áreas rurales chilenas. *EURE (Santiago)*, 50(151), 1-25.
- Oppliger, A., Höhl, J., & Fragkou, M. (2019). Escasez de agua: Develando sus orígenes híbridos en la cuenca del Río Bueno, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (73), 9–27.
- Ochoa, F., Delgado, V., Álvez, A., & Rivera, D. (2016). El acceso al recurso hídrico en la praxis judicial chilena: paradojas y malas prácticas. *Actas de Derecho de Aguas*, 6, 28.
- Ohab-Yazdi, S. A., & Ahmadi, A. (2018). Using the agent-based model to simulate and evaluate the interaction effects of agent behaviors on groundwater resources, a case study of a sub-basin in the Zayandehroud River basin. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 87, 274-292.
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 1068–1072.
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419-422.
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge university press.
- Pande, S., & Sivapalan, M. (2016). Progress in socio-hydrology: A meta-analysis of challenges and opportunities. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(4), e1193.
- Pouladi, P., Afshar, A., Afshar, M. H., Molajou, A., & Farahmand, H. (2019). Agent-based socio-hydrological modeling for restoration of Urmia Lake: Application of theory of planned behavior. *Journal of hydrology*, 576, 736-748.
- Rakesh Kumar Mishra (2023) Fresh Water availability and Its Global challenge, *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies: Sustainability* 4(3),1-78

- Ramírez, E., Modrego, F., Macé, J. C., & Yáñez, R. (2009). Caracterización de los actores de Chiloé Central. *Documento de trabajo/Programa Dinámicas Territoriales Rurales. RIMISP-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural; no. 55.*
- Rebaudo, F., & Dangles, O. 2014. Un modelo socio-ecológico para establecer escenarios de dinámica de bofedales frente a los cambios globales. *Ecología en Bolivia*, 49:3, pp. 141- 153
- Rivas Ponce, D. F. (2022). Luchas y conflictos socioambientales por el agua en Chile y México. *Revista de Ciencias Sociales*, 50(1), 24–34.
- Rodríguez Zoya, L. G. (2018). Contribución a la crítica de la teoría de los sistemas complejos: bases para un programa de investigación. *Estudios sociológicos*, 36(106), 73-98.
- Rojas, R. A. G., & Fragkou, M. C. (2021). ¿Infraestructura ante la crisis hídrica? Políticas de Estado en los ríos Petorca y La Ligua. *Cuadernos Médico Sociales*, 61(1), 61–71.
- Ruiz, P., Herrero, A., Zavala, M.A. 2013. Vulnerabilidad de los bosques españoles frente al Cambio Climático: evaluación mediante modelos. *Ecosistemas* 22:3, pp, 21-28.
- Shiklomanov, I. A., & Rodda, J. C. (Eds.). (2003). *World water resources at the beginning of the twenty-first century*. Cambridge University Press.
- Simonovic, S. P., Fahmy, H., & El-Shorbagy, A. (1997). The use of object-oriented modeling for water resources planning in Egypt. *Water Resources Management*, 11(4), 243-261.
- Sivapalan, M., Savenije, H. H., & Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol. Process*, 26(8), 1270-1276.
- Sivapalan, M. (2015). Debates—Perspectives on socio-hydrology: Changing water systems and the “tyranny of small problems”—Socio-hydrology. *Water Resources Research*, 51(6), 4795-4805.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). 2022. Informe de Coberturas Sanitarias. Disponible en: <https://c.bcn.cl/jxJNrV> [Recuperado el 10 de septiembre de 2025]
- UNESCO. (2024). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz*. Disponible en: [\[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948\]](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948)
- Villarroel Bloomfield, F., & Vodanovic, S. (2011). *Asociaciones públicas comunitarias de agua potable rural en Chile (APR): caracterización, función, contexto y desafíos* (Doctoral dissertation, Universidad Academia de Humanismo Cristiano).
- Smit, B., & Wandel, J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, pp. 282–292.

- Taddei, E. H. (2023). Crisis hídrica y mercantilización del agua en tiempos de neoliberalismo catastrófico. *Neoliberalismo [capitalismo] catastrófico. Imágenes de la última ola neoliberal y las alternativas en Nuestra América* 1, 29-59.
- Villarroel Bloomfield, F., & Vodanovic, S. (2011). *Asociaciones públicas comunitarias de agua potable rural en Chile (APR): caracterización, función, contexto y desafíos* (Doctoral dissertation, Universidad Academia de Humanismo Cristiano).
- Vásquez, N., Cepeda, J., Gómez, T., Mendoza, P. A., Lagos, M., Boisier, J. P., ... & Vargas, X. (2021). Catchment-scale natural water balance in Chile. *Water resources of Chile*, 189-208.
- Wang, Y., Meili, N., & Fatichi, S. (2023). Evidencia y controles de la aceleración del ciclo hidrológico sobre la tierra. *Water Resources Research*, 59(8), e2022WR033970.
- Wu, P., Christidis, N., & Stott, P. (2013). Impacto antropogénico en el ciclo hidrológico de la Tierra. *Nature Climate Change*, 3(9), 807–810.
- Xia, J., Dong, Y., & Zou, L. (2022). Developing socio-hydrology: Research progress, opportunities and challenges. *Journal of Geographical Sciences*, 32(11), 2131–2146.
- Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Ciclo hidrológico y recursos hídricos en un mundo cambiante: Una revisión. *Geografía y Sostenibilidad*, 2(2), 115–122.
- Yu, D. J., Haeffner, M., Jeong, H., Pande, S., Dame, J., Di Baldassarre, G., ... & Sivapalan, M. (2022). On capturing human agency and methodological interdisciplinarity in socio-hydrology research. *Hydrological Sciences Journal*, 67(13), 1905-1916.
- Zucchetti, A., Gonzales, P., Alcántara, T., Hartmann, N., Cánepa, M., & Gutierrez, C. (2020). Infraestructura verde y soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático: prácticas inspiradoras en ciudades de Perú, Chile y Argentina.