



Facultad de Economía y Negocios
Escuela de Ingeniería Informática Empresarial

**MODELO DE SIMULACIÓN DE ALTO NIVEL DE ABSTRACCIÓN PARA EL
ANÁLISIS DE ESCENARIOS DEL AGUA EN CHILE**

Autores: Luis Muñoz Canales

Maycol López Rebolledo

Profesor Guía: Martin Schaffernicht

Proyecto de Memoria para optar al título de INGENIERO INFORMÁTICO
EMPRESARIAL

TALCA – CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2023

En esta importante etapa agradecemos a nuestros familiares, docentes y amigos quienes han sido un apoyo fundamental durante este proceso, el cual más allá de un acto curricular marca un hito en nuestras vidas que será recordado con orgullo junto con el crecimiento que conseguimos en el camino.

ÍNDICE

RESUMEN.....	9
SUMMARY	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Modelos de Simulación	14
2.1.1 Tipos de modelado de simulación	14
2.1.2 ¿Qué es una simulación?	15
2.1.3 Ventajas e inconvenientes de la simulación	16
2.1.4 Software para simulación	18
2.1.5 Dinámica de sistemas	19
2.2 Respecto al Uso de Recursos Hídricos	24
2.2.1 Crisis hídrica	24
2.2.2 Ciclo del agua	25
2.2.3 Tipos de uso de agua	28
2.2.4 Huella hídrica	29
2.2.5 Balance Hídrico.....	31
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	34
3.1 Fases del proceso de modelado	34
3.1.2 Elaboración de modelo conceptual	35
3.1.3 Cuantificación de modelo	36
3.1.4 Validación de modelo.....	38
3.1.5 Explotación de modelo.....	39
3.2 Fuentes de datos	39
3.3 Documentación.....	42
CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	44

4.1 Modelo de Dinámica de Sistemas.....	44
4.1.1 Definición de problema	46
4.1.2 Elaboración de modelo conceptual	47
4.1.3 Cuantificación de modelo.....	51
4.1.4 Validación del modelo.....	60
4.2 Recopilación de datos.....	62
4.2.1 Evapotranspiración	62
4.2.2 Escorrentía	64
4.2.3 Precipitación	65
4.3 Simulaciones preliminares	65
4.3.1 Primera Simulación.....	66
4.3.2 Segunda Simulación	72
4.3.3 Tercera Simulación	78
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS.....	83
5.1 Análisis estado inicial agua subterránea	83
5.2 Análisis con cambio en la extracción	85
5.3 Análisis con cambios en promedio extracción mensual e incremento en la producción	88
5.4 Análisis general	90
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXO I. Modelo Ciclo del Agua Sin Agentes.....	97
ANEXO II. Modelo del Ciclo del Agua Con Agentes.....	98
ANEXO III. Modelo del Ciclo del Agua Con Agentes e Interacción Humana	99
ANEXO IV. Documentación Variables de Modelo	100
ANEXO V. Tabla Evapotranspiración total año 2019	116
ANEXO VI. Tabla Evapotranspiración total año 2020	116

ANEXO VII. Tabla Evapotranspiración total año 2021	117
ANEXO VIII. Tabla Evapotranspiración total año 2022	117
ANEXO IX. Derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro (2019-2022).....	118
ANEXO X. Mapa tipos de derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro (2019 - 2022)	118
ANEXO XI. Mapa derecho de agua San Clemente, considerando subcuencas río Claro, Maule Medio y Maule Alto	119
ANEXO XII. Mapa derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro.....	120
ANEXO XIII. Tabla Valores Precipitación 2019 – 2021	120
ANEXO XIV. Tabla Uso Consuntivo Agua subterránea.....	122
ANEXO XV. Tabla Valores Simulación 1 Agua Subterránea.....	123
ANEXO XVI. Tabla Valores Simulación 2 Agua Subterránea.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Símbolos para diagramas de acumulador y flujo	37
Tabla 2. Comparación de nivel de prioridad para la aplicación de la metodología del balance hídrico en macrozona centro.....	41
Tabla 3. Derechos de agua asociados a cada cuenca en macrozona centro.....	42
Tabla 4. Evapotranspiración total de San clemente (enero 2019 – agosto 2022).....	63
Tabla 5. Caudal anual promedio en base a derechos de agua, San Clemente – Río Claro ..	64
Tabla 6. Total Precipitaciones durante los periodos de 2019 -2021	65
Tabla 7 Documentación de variables del modelo.....	100
Tabla 8 Tabla Evapotranspiración total año 2019	116
Tabla 9 Tabla Evapotranspiración total año 2020	116
Tabla 10 Tabla Evapotranspiración total año 2021	117
Tabla 11 Tabla Evapotranspiración total año 2022	117
Tabla 12 Derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro (2019-2022)	118
Tabla 13 Tabla Valores Precipitación 2019 – 2021	121
Tabla 14 Tabla Uso Consuntivo Agua subterránea.....	122
Tabla 15 Tabla Valores Simulación 1 Agua Subterránea	123
Tabla 16 Tabla Valores Simulación 2 Agua Subterránea	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama causal de un sistema de primer orden con realimentación negativa.	20
Figura 2. Diagrama de flujos de un sistema de primer orden con realimentación negativa. ...	21
Figura 3. Diagrama de primer orden con realimentación positiva.....	21
Figura 4. Crecimiento en S de una variable.	22
Figura 5. Diagrama causal de crecimiento en S.....	22
Figura 6. Diagrama causal de un sistema de segundo orden.....	23
Figura 7. El ciclo del agua.....	26
Figura 8. Distribución del agua en el planeta.	28
Figura 9. Modelo interacción humano – recursos hídricos en el contexto de producción agrícola.....	29
Figura 10. Modelo final interacción humano – ciclo del agua	45
Figura 11. Modelo de bucle causal crisis hídrica.....	48
Figura 12. Diagrama de Forrester Crisis Hídrica	49
Figura 13. Representación de interacciones variables de stock & flows.....	50
Figura 14. Ejemplo modelo árbol causal	51
Figura 15. Árbol causal variable Agua en Plantas.....	52
Figura 16. Árbol causal variable Agua en superficie	53
Figura 17. Árbol causal variable Agua Subterránea	54
Figura 18. Árbol causal variable Río Maule.....	55
Figura 19. Árbol causal variable Río Claro.....	56
Figura 20. Árbol causal variable Agua filtrándose	57
Figura 21. Árbol causal variable Agua Potable.....	58
Figura 22. Árbol causal variable Planta de aguas servidas	58
Figura 23. Intersección comuna de San Clemente – Río Claro.....	64
Figura 24. Primer modelo simulado interacción humana – ciclo del agua	66
Figura 25. Gráfico Agua en nubes – Simulación1	67
Figura 26. Gráfico Agua en montañas – Simulación1	68
Figura 27. Gráfico Agua en plantas – Simulación1	69
Figura 28. Gráfico Agua en ríos y lagos – Simulación1.....	70
Figura 29. Gráfico Agua subterránea– Simulación1	71
Figura 30. Gráfico Caudal de corriente– Simulación1	71
Figura 31. Modelo Interacción humano – ciclo del agua para 2da simulación.....	72

Figura 32. Gráficos de comportamiento de variables de stock estables simulación 2	76
Figura 33. Gráficos de comportamiento de variables de stock exponenciales simulación 2..	77
Figura 34. Gráficos de comportamiento de variables de stock estables simulación 3.	81
Figura 35. Gráficos de comportamiento de variables de stock exponenciales simulación 3..	82
Figura 36. Gráficas de comportamiento del agua subterránea sin cambios	84
Figura 37. Gráficas del comportamiento del agua subterránea con cambios	86
Figura 38. Gráficas de comportamiento del agua subterránea con aumento excesivo,.....	87
Figura 39. Gráficas del comportamiento del agua subterránea con aumento.....	89

RESUMEN

En la actualidad se puede observar una creciente escasez hídrica en la zona centro Norte del país, para la cual las estrategias de gestión actuales dejan al público general fuera de foco. Por esto, resulta fundamental contar con herramientas que permitan analizar los eventuales escenarios que presentan los recursos naturales. En este contexto, en el presente trabajo se completó el desarrollo de un modelo computacional que incluye el ciclo del agua y sus conexiones con las actividades humanas que requieren de este recurso. Con esto se responde a la necesidad de contar con una herramienta que permita contener información compleja y completa, pero que a su vez logre ser fácil de entender para un público general. Los datos para el desarrollo del modelo fueron obtenidos desde diversas bases de datos pertenecientes a la Dirección general de aguas (DGA), Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Center for Climate and Resilience Research (CR2), entre otros.

Los resultados obtenidos generan un avance en la educación de las personas respecto a cómo los patrones de consumo humano influyen en la escasez de agua. Se destaca la versatilidad de la metodología de “Dinámica de sistema” para poder aplicarse en distintas áreas. Se espera que este modelo sea un aporte para mejorar los patrones de consumo hídrico humano, y así mismo sirva como una futura herramienta en la gestión de planes y toma de decisiones respecto al uso de recursos hídricos.

SUMMARY

At present, a growing water scarcity can be observed in the North central zone of the country for which current management strategies leave the public out of focus. For this reason, it's essential to have tools that allow analyzing the eventual scenarios presented by natural resources. In this context, the present study completed the development of a computational model that includes the water cycle and its connections with human activities that require this resource. This responds to the need for a tool that allows complex and complete information to be contained, but that at the same time manages to be easy to understand for a general public. The data for the development of the model were obtained from various databases belonging to the "Dirección General de Aguas" (DGA), "Instituto de Investigaciones Agropecuarias" (INIA), Center for Climate and Resilience Research (CR2), among others.

The results obtained generate progress in the education of people regarding how human consumption patterns influence water scarcity. The versatility of the "System Dynamics" methodology is highlighted to be applied in different areas. It's expected that this model will be a contribution to improve the patterns of human water consumption and likewise serve as a future tool in the management of plans and decision making regarding for the use of water resources.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Actualmente, podemos ver la problemática de la escasez de agua como consecuencia de la disminución de las precipitaciones en la zona Centro-Norte que el país experimenta desde hace más de una década, transformándose en una sequía recurrente, además del aumento de la necesidad de este recurso debido a los patrones de consumo y de producción. Según la Dirección General de Aguas (DGA, 2020), las regiones entre Atacama y Ñuble mantienen un déficit de precipitación de casi 100% con respecto al promedio histórico 1981-2010 y los acuíferos muestran una tendencia a la baja entre la región de Coquimbo y el Maule. Adicionalmente, se aprecia que las estrategias actuales de gestión de recursos hídricos dejan el público general (hogares como consumidores y electores) fuera del foco de atención.

Así, el desarrollo insostenible de la sociedad ha traído como consecuencia una crisis climática a nivel mundial, escenario que se torna cada vez más crítico, ya que afecta directamente a la posibilidad de acceder a los recursos naturales necesarios para la vida. No obstante, este no es el único factor que contribuye al déficit hídrico: el aumento de la población, el crecimiento económico y la especialización de sectores intensivos en uso de agua, tales como minería, agricultura, silvicultura y acuicultura, impulsaron la demanda hídrica nacional (OCDE, 2017). Asimismo, se proyecta al 2030 un aumento del 4,5% y de 9,7% al 2040, en la demanda consuntiva de agua (DGA, 2017).

En este contexto, resulta fundamental contar con herramientas que permitan analizar los eventuales escenarios que se presentan para los recursos naturales y, de esta manera, facilitar la toma de acciones respecto a una correcta gestión, con un enfoque sostenible, en la utilización de estos recursos. La importancia de lo anterior resulta evidente cuando se observa que, al no existir certeza de la manera en que irá cambiando el escenario en el porvenir, así como de la forma en que interactúa cada factor (precipitaciones, empleo de energía, consumo directo, etc.) con este déficit, es complejo tomar medidas pertinentes para evitar la crisis. Esto particularmente cuando se conoce que una de las principales brechas para regular la expansión de la demanda de agua en la agricultura, en cuanto a conocimiento e información, es la falta de conciencia y responsabilidad de cada usuario en relación con la menor disponibilidad hídrica actual y proyectada, la necesidad de reducir la demanda y mejorar la eficiencia del uso, así como mitigar la contaminación del agua (UNESCO, 2021).

Al no tener un medio con el cual visualizar el nivel de esta problemática, el público no la percibe (distante en territorio, en tiempo y cadenas causales largas) o toma en cuenta, por lo cual la mayoría de la población no interioriza el nivel de gravedad de esta crisis y no considera ajustar sus patrones de comportamiento. Como no existe un modelo que sea a la vez suficientemente simple para el público general y suficientemente exacto con los aspectos relevantes del agua, no se puede reforzar la perceptibilidad de lo lejano, lo lento y lo indirecto.

En esta memoria se realizará un modelo computacional de una cuenca simplificada, que incluya el ciclo del agua y su conexión con las actividades humanas que requieren agua, como el uso de energía, la producción de algunos productos y alimentos, tanto para el consumidor local, como de exportación. Se espera que este modelo sea una herramienta que implique información compleja y completa, pero que a su vez logre ser fácil de entender para un público general. De este modo, se podrá educar a la población sobre el impacto de la utilización del agua y los escenarios que este configura, a fin de que tengan una mayor participación ajustando sus patrones de consumo, con el objeto de sobrellevar la escasez del agua y poder tomar medidas que ayuden a evitar una posible crisis hídrica.

El tipo de investigación utilizada es cuantitativa, ya que se recurre a datos estadísticos para el desarrollo del modelo, y la metodología propuesta es la de dinámica de sistemas, puesto que permite modelar el comportamiento de diferentes agentes en un entorno determinado.

El objetivo general de esta investigación es identificar los posibles escenarios del agua en Chile mediante el desarrollo de un modelo que sea capaz de destacar los aspectos relevantes del uso del agua y, al mismo tiempo, sea perceptible para el público general. Los objetivos específicos son:

- Desarrollar una conceptualización de la interacción agua-humano en un territorio definido que sea compatible con el conocimiento científico sobre el agua y la capacidad de entendimiento de no-especialistas.
- Desarrollar un modelo computacional que permita realizar proyecciones sobre los futuros escenarios del agua en la región.
- Estimar los posibles escenarios por medio de simulaciones.

Para sintetizar, esta memoria consta de 6 capítulos en su estructura. El primero, en forma general, introduce el tema de investigación para dar el contexto de la necesidad del modelado en la problemática abordada, el escenario de la crisis hídrica actual, junto con la forma en la

cual se desarrollará la investigación y sus objetivos. A continuación, se aborda el marco teórico, el cual presenta dos capítulos correspondientes a modelos de simulación y al uso de recursos hídricos. El tercer capítulo expone la metodología a implementar en la investigación, luego el enfoque del cuarto capítulo radica en la presentación de los resultados obtenidos basándose en los métodos seleccionados asociados a dinámica de sistemas. Más adelante, se puede apreciar, en el quinto capítulo, los análisis obtenidos en esta investigación y los resultados de los escenarios simulados en este proceso. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones obtenidas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

A fin de profundizar en el contexto de esta memoria de investigación, junto con los factores claves respecto a las bases de esta misma, a continuación, se aborda la literatura existente en relación con modelos de simulación y al uso de recursos hídricos.

2.1 Modelos de Simulación

Con el objetivo de entender la razón del uso de modelos de simulación dentro del marco de esta memoria y cómo estos pueden ser aplicados al uso de recursos hídricos dentro de ecosistema existente, es necesario discutir cuál es su utilidad, las diversas variantes que existen y en qué situaciones pueden ser utilizados.

2.1.1 Tipos de modelado de simulación

La literatura sobre los modelos de simulación indica que existen diferentes tipos de modelos (Ríos, 2000), de los cuales, a continuación, se mencionan 4:

Modelos estáticos:

Estos se utilizan para dar respuesta a una serie de condiciones fijas, que probablemente no sufrirán cambios significativos a corto plazo, por lo cual, el resultado se basa en condiciones estáticas.

Modelos dinámicos:

Este tipo se caracteriza por tener como estudio la trayectoria temporal específica de los elementos seleccionados para análisis, ya que estos elementos intervienen con el proceso de modelado, varían y se consideran como funciones de tiempo.

Modelos determinísticos:

Se consideran determinístico cuando al modelo se le asignan valores determinados con certeza absoluta, tanto en las variables temporales, como en los parámetros de este.

Modelos estocásticos:

Se consideran estocásticos cuando los valores que utiliza el modelo no son determinados con certeza absoluta, en cambio, se basan en una determinada probabilidad, lo cual se considera un proceso estocástico que es desde donde este modelo adquiere el nombre.

2.1.2 ¿Qué es una simulación?

De forma general se podría entender que una simulación es algo ficticio que, si bien puede tomar en cuenta factores y variables reales, no se lleva a cabo en un espacio físico. Aunque esto no significa que los resultados de esta no se puedan volver reales o acercarse mucho a un escenario real. Breneman et al. (1997) definen la teoría de la simulación como “*un medio que experimenta con un modelo detallado de un sistema real para determinar cómo responderá el sistema a los cambios en su estructura o entorno*”. Por otro lado, se podría afirmar que la simulación permite experimentar con un modelo del sistema para comprender mejor los procesos, con el fin de mejorar la actividad en las empresas (Harrington y Tumay, 2003).

Pero para poder entender más sobre qué es una simulación, primero es necesario conocer el concepto de sistema, el cual se podría definir como un conjunto de elementos que están estrechamente relacionados entre sí mediante interdependencias, y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo (Breneman et al., 1997; Harrington y Tumay, 2003). En este sentido, una simulación se puede concebir como un sistema de realimentación, donde los elementos/procesos que la componen pueden ser afectados por nuevos, donde estos mismos pueden proyectarse, ser evaluados y contemplarse sin ningún riesgo asociado a experiencias en un sistema real.

En este ámbito Forrester (1961) define la simulación como el proceso de realización de experimentos sobre un modelo en lugar de hacerlo con un sistema real. Este concepto es crucial para comprender lo que es simulación debido a que permite comprender las interacciones de un sistema respecto al sistema real, pero con la ventaja de no requerir pruebas de manera física con el sistema real.

En cuanto a la simulación por computadora, existen varias discusiones sobre la definición de esta misma. Por una parte, Humphreys (1990) definía una simulación de computadora como

“cualquier método implementado por computadora para explorar las propiedades de modelos matemáticos donde los métodos analíticos no están disponibles”. Aunque esta definición hoy en día aún es aceptada, Hartmann (1996) ha sugerido 2 correcciones a la definición que terminó dando como resultado su propia definición de simulación de computadora, donde explica que *“las simulaciones están estrechamente relacionadas con modelos dinámicos. Más concretamente, una simulación resulta cuando se resuelven las ecuaciones del modelo dinámico subyacente. Este modelo está diseñado para imitar la evolución temporal de un sistema real. Dicho de otro modo, una simulación imita un proceso mediante otro proceso. Si la simulación se ejecuta en una computadora, se llama simulación por computadora”*.

Tomando en cuenta la definición de Hartmann, la creación de un modelo de simulación computacional sobre los escenarios del agua se basaría en la creación de un modelo dinámico donde:

- a. Se está imitando un sistema y sus procesos.
- b. El sistema analizado es dinámico, varía a través del tiempo y con base en sus procesos y agentes.
- c. Se resuelven ecuaciones con base en las diferentes interacciones de agentes dentro del modelo, tomando en cuenta el impacto que tiene cada interdependencia.
- d. El resultado de la simulación se ejecuta en un ordenador.

2.1.3 Ventajas e inconvenientes de la simulación

Como todo método, la simulación presenta ventajas e inconvenientes respecto a su uso, donde el detectar errores y corregirlos desde una perspectiva de desarrollo apropiado de un modelo mental, es una de las principales utilidades de la simulación. No obstante, el principal obstáculo es la alta inversión de tiempo requerido en el aprendizaje de esta metodología (Schaffernicht, 2009).

En base a la literatura analizada, se destaca notoriamente la utilidad del uso de simulación de sistemas en el contexto de la presente investigación. Como plantean Sulis y Sechi (2013), *“Los modelos genéricos de simulación proporcionan información y conocimientos que pueden ayudar a mejorar los procesos de gestión y planificación de los sistemas de agua”*. Este

enfoque ha ido aumentando debido las situaciones de crisis hídrica en diferentes localidades que requieren de medidas de mitigación de la sequía mediante sistemas de gestión hídrica.

Así, estos sistemas de apoyo en la toma de decisiones presentan utilidades a diferentes niveles de complejidad, según los requerimientos del usuario y en base al manejo de conocimientos, pudiendo combinarse en enfoques mixtos de optimización-simulación para abordar la crisis hídrica de la sequía en los posibles escenarios hidrológicos (Pallottino et al., 2005; Sulis y Sechi, 2013).

Existe una variedad de modelos de simulación disponibles, los cuales pueden aportar en el proceso de toma de decisiones respecto a la gestión del recurso hídrico por parte de las autoridades; además de ello, existen bastantes mejoras que pueden ser focalizadas también en el trabajo de planificadores, gestores, modalizadores y analistas relacionados a la gestión hídrica (Assaf et al., 2008).

Por lo tanto, al contar con la utilidad de los modelos de simulación en el contexto de la problemática de esta investigación, se logra establecer medidas de mitigación más adecuadas a la crisis hídrica, pudiendo mitigar impactos de diversa índole como lo son económicos, sociales y medioambiental que conlleva esta crisis. En la actualidad, las medidas implementadas por diferentes autoridades son del tipo reactivas y no preventivas a la crisis, por lo cual se presenta una necesidad urgente de una gestión más eficiente en base al riesgo futuro (Rossi et al., 2007; Sulis y Sechi, 2013).

Respecto a los inconvenientes mencionados en literatura, se destacan los enunciados por Shanon (1975) que incluyen el elevado coste, la inversión de tiempo y la complejidad respecto de la elaboración del modelo. También el autor menciona como inconveniente el riesgo presente de no incluir algún elemento o variable en principio aparentemente innecesaria, pero en suma de alta importancia, generando que el modelo presente resultados falsos, lo cual implica la pérdida de la validez del modelo desarrollado. Por último, el autor menciona la dificultad respecto de conocer el nivel de imprecisión de los resultados obtenidos mediante el modelo.

En base a lo anterior es posible comprender que, a pesar de presentar grandes ventajas el método de la simulación, también hay que tener presentes los inconvenientes mencionados, los cuales pueden implicar altos costes para la persona que aplica este método y también la

posibilidad de obtener resultados falsos al errar en algún factor de apariencia trivial en el desarrollo.

2.1.4 Software para simulación

En la actualidad existen diferentes tipos de modelos que pueden satisfacer diferentes necesidades en torno a mejorar los procesos de gestión y planificación del sistema de agua. Sulis y Sechi (2013) afirman *“es necesario lograr una integración total entre simulación y optimización lo cual no se ha logrado aun, dado que las aplicaciones del mundo real son frecuentemente modelos de simulación genéricos”*.

En este contexto, es necesario analizar diversos de estos modelos de simulación con la finalidad de tener una mejor concepción sobre los modelos de simulación. Dentro de estos modelos y en base a lo presentado por Sulis y Sechi (2013), están:

- AQUATOOL: Es un sistema de soporte de decisiones (DSS), el cual fue diseñado para las etapas de gestión operativa y planificación de la toma de decisiones en cuencas o recursos hídricos, proporcionando recursos para facilitar el análisis de diversos problemas relacionados con la gestión del agua dependiendo del módulo que se esté utilizando (SIMGES, GESCAL, OPTIGES, SIMRISK, EVALHID).
- WARGI: Es una herramienta desarrollada específicamente para ayudar a los usuarios a comprender las interrelaciones entre demandas y recursos para sistemas de agua de múltiples embalses en condiciones de sequía, como las que ocurren con frecuencia en las regiones mediterráneas.
- MODSIM: Es un sistema generalizado de DSS en cuencas fluviales y un modelo de flujo de red desarrollado específicamente para satisfacer las crecientes demandas y presiones sobre los administradores de cuencas fluviales en la actualidad. En este sentido se puede mencionar que MODSIM es una herramienta que simula la asignación de agua en el sistema en cada paso de tiempo, a través de una solución secuencial de un problema de optimización de flujo de red.

Si bien estos softwares brindan una perspectiva sobre modelos de simulación que apoyan la gestión de los recursos hídricos, en términos generales y en el ámbito de modelos de simulación, no son de uso común; es decir, son softwares especializados y el usarlos requiere un mayor estudio y conocimiento. Por otra parte, EN-ROADS es un simulador climático global que contiene aproximadamente 30 políticas de impacto, que está modelado a través del software de simulación VENSIM y enfocado en dinámica de sistemas, por lo que resulta intuitivo y no requiere grandes cantidades de tiempo para comprender su funcionamiento.

2.1.5 Dinámica de sistemas

Desarrollada a mediados de la década de los 50 por Jay Forrester, esta metodología nació debido a la necesidad de analizar la existencia de estructuras de retroalimentación de la información dentro de un sistema. Bajo la premisa de que en los bucles de retroalimentación con demoras se pueden presentar oscilaciones, se dio origen al estudio de este comportamiento dinámico centrando los análisis en los elementos que influyen en los procesos e interrelaciones existentes entre los mismos; todo esto con el objetivo de justificar los comportamientos oscilantes por medio de la detección de bucles de realimentación negativos (Forrester, 1961).

Esta metodología, en principio, se nombró dinámica industrial debido a que fue desarrollada para solucionar problemáticas en las industrias, pero al lograr ser aplicada en diversos sistemas sociales, paso a ser denominada dinámica de sistemas (González-Busto, 1998). Existen cuatro fundamentos predecesores a su origen, los cuales permitieron la factibilidad de la dinámica industrial: el primero fue la teoría sobre los sistemas de realimentación de información; el segundo, tiene relación con las bases de las investigaciones efectuadas en cuanto a la naturaleza de la adopción de decisiones en el ámbito de las tácticas militares modernas; tercero, se relaciona con el diseño de modelos experimentales de sistemas altamente complejos; y el cuarto, tiene relación con la aparición de los computadores digitales al ser el instrumento idóneo para los cálculos y cómputos requeridos por los modelos desarrollados mediante esta metodología (Forrester, 1961).

A fin de facilitar el proceso de modelado, se definen estructuras elementales de realimentación en los modelos de dinámica de sistemas. En la literatura, Aracil (2005) menciona 5 estructuras en concreto, las cuales están presentes con alta frecuencia en la práctica del modelado. Estas

estructuras simples favorece en la búsqueda de las relaciones estructurales causantes del comportamiento dinámico y corresponden a:

- Bucles de primer orden de realimentación negativa, asociados a procesos de autorregulación u homeostáticos.
- Bucles de primer orden de realimentación positiva, asociados a fenómenos de crecimiento.
- Bucles de segundo orden en los que se observan oscilaciones en la búsqueda de la consecución de un objetivo.
- Curvas de crecimiento en S, que modelan procesos de crecimiento muy comunes en la práctica.
- Fenómenos de acoplamiento entre dos bucles, de realimentación positiva y negativa respectivamente.

2.1.5.1 Sistemas de primer orden

Los sistemas de primer orden corresponden a los que poseen solo un único nivel en su estructura, no presentan oscilaciones y los bucles de retroalimentación en su estructura pueden ser positivos y/o negativos, representando respectivamente a crecimiento o autorregulación (González-Busto, 1998).

En los *sistemas de primer orden de realimentación negativa* el comportamiento se ve determinado por la consecución de x objetivo. En las Figuras 1 y 2 se representa de manera simple los diagramas de bucle y flujos.

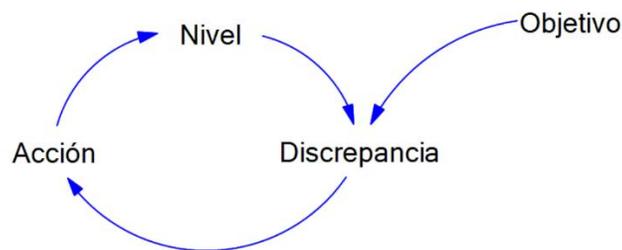


Figura 1. Diagrama causal de un sistema de primer orden con realimentación negativa. (Fuente: Aracil, 2005)

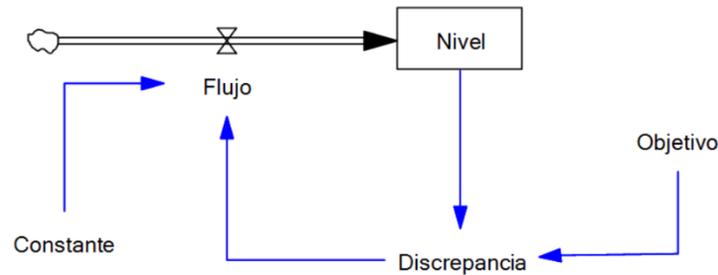


Figura 2. Diagrama de flujos de un sistema de primer orden con realimentación negativa. (Fuente: Aracil, 2005)

Según la relación entre el valor inicial del nivel y el objetivo, los bucles de primer orden con realimentación negativa generan comportamientos de crecimiento o decrecimiento asintóticos. En cambio, los *sistemas de primer orden con retroalimentación positiva* generan comportamientos de crecimiento o decrecimiento exponencial. El análisis de estos sistemas es de carácter análogo respecto a los de retroalimentación negativa, pero con la diferencia de que en los de retroalimentación positiva no se presenta un objetivo a alcanzar o mantener. De manera sencilla se representan con el diagrama de flujo de la Figura 3.

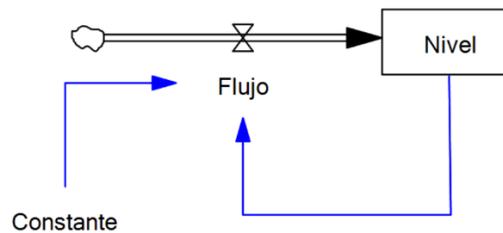


Figura 3. Diagrama de primer orden con realimentación positiva. (Fuente: Aracil, 2005)

El *crecimiento en S*, denominado crecimiento sigmoideal o crecimiento logístico, respecto de la evolución de una variable presenta dos fases o etapas diferenciadas, las cuales consisten en crecimiento exponencial y seguido de una fase de decrecimiento asintótico. La primera fase presenta un comportamiento similar a lo presentado en los sistemas de retroalimentación

positiva, mientras que, en la segunda fase, el comportamiento es análogo a los sistemas de realimentación negativa. Este crecimiento en S se representa de forma gráfica en la Figura 4.

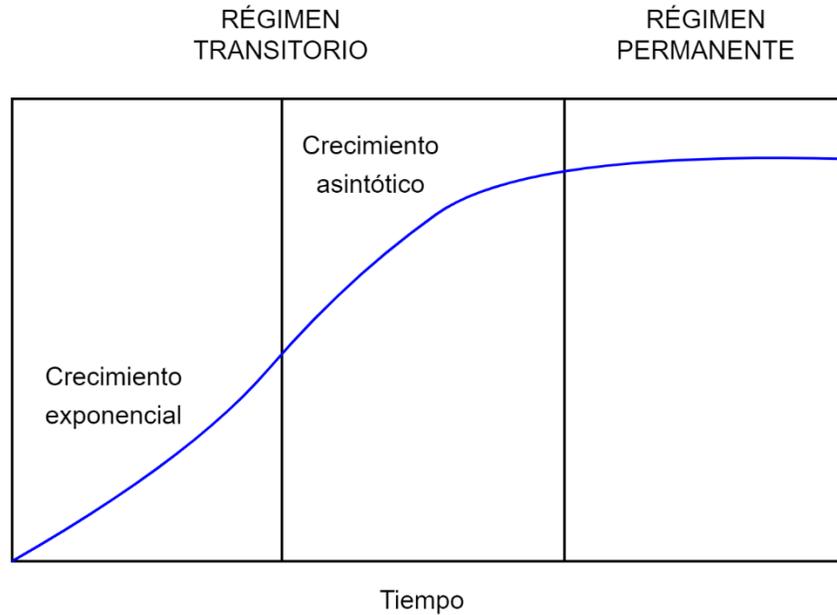


Figura 4. Crecimiento en S de una variable. (Fuente: Aracil, 2005)

Con el fin de visualizar los bucles de retroalimentación positivo y negativo, respecto al crecimiento en S, se presenta el diagrama de flujos de la Figura 5.

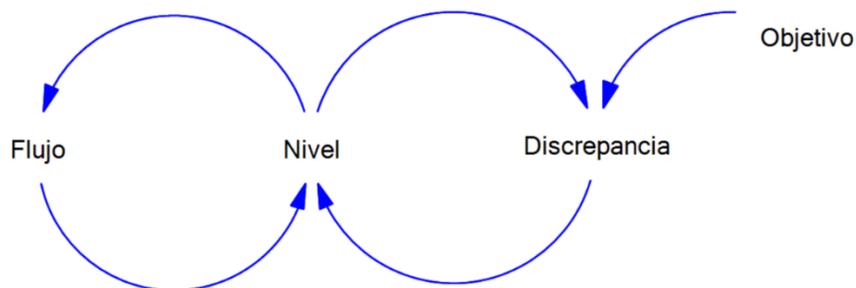


Figura 5. Diagrama causal de crecimiento en S. (Fuente: Aracil, 2005)

2.1.5.2 Sistemas de segundo orden

Respecto a los sistemas de segundo orden, se definen como aquellos sistemas que en su estructura presentan dos niveles, los cuales en un total de hasta tres bucles de retroalimentación, encuadran a los niveles asociados (Figura 6). De los tres bucles de retroalimentación, uno posee el carácter de principal y los restantes se consideran secundarios, logrando así que el bucle principal conecte ambos niveles entre sí y los bucles secundarios conectan cada nivel entre sí.

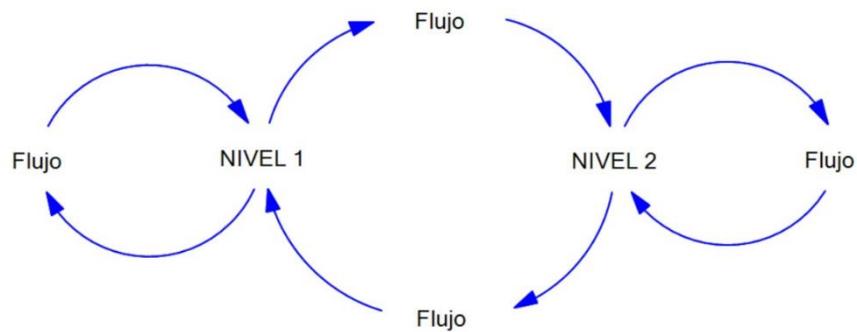


Figura 6. Diagrama causal de un sistema de segundo orden. (Fuente: Aracil, 2005)

A diferencia de los sistemas de primer orden, estos sistemas pueden presentar oscilaciones en su comportamiento. Estas oscilaciones en los sistemas de segundo orden se clasifican en distintos tipos, pudiendo ser: amortiguadas o sobre amortiguadas, mantenidas o no amortiguadas, crecientes o sub-amortiguadas (Aracil, 2005).

2.2 Respecto al Uso de Recursos Hídricos

El agua es el recurso básico de la vida, así como también el recurso natural más importante de nuestro país, puesto que es el elemento central de la estructura productiva, ambiental y de desarrollo económico y social. En este contexto, se puede plantear que los recursos hídricos son un pilar fundamental para el desarrollo de la sociedad (UNESCO, 2003).

2.2.1 Crisis hídrica

En el contexto de la crisis climática, en Chile, durante más de una década se ha estado experimentando una mega sequía que ha afectado a toda la zona centro del país. Esto se debe en parte a un déficit de precipitaciones de entre un 20% y un 40%, con la consecuente disminución de la acumulación nival, de los volúmenes de los embalses y de los niveles de agua subterránea (DGA, 2020).

Sin embargo, es necesario mencionar que la crisis hídrica no solo es debido a la disminución de precipitaciones, sino también al uso desmedido de agua en actividades de producción, y también a la casi nula percepción de valor del agua por parte de la población, ya sea desde una perspectiva económica, ambiental o ecosistémica, lo que se resume en una carencia evidente del cuidado del agua (Pizarro et al., 2022).

En este contexto, con base en lo analizado por las Naciones Unidas (UNESCO, 2021) y con el fin de cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Chile, se han identificado 7 dimensiones que afectan a la problemática de la escasez hídrica: 1) los efectos del cambio climático, 2) presiones de las actividades productivas y/o extractivas; 3) brecha de gestión de recursos hídricos; 4) infraestructura inadecuada para enfrentar la escasez hídrica; 5) limitaciones del marco legal actual; 6) dispersión institucional en la toma de decisiones que obstaculiza la coordinación; y 7) disponibilidad y uso limitado de datos para la toma de decisiones.

Es necesario considerar que, de estas 7 dimensiones, la realización de un modelo de simulación solo satisface directamente 2, las cuales son:

- **La gestión de los recursos hídricos:** En conjunto Chile cuenta con 55.640 m³/persona al año, lo cual supera los 2.000 m³/persona considerados como el umbral para el desarrollo sostenible (OCDE, 2017). La cantidad de agua y calidad de esta varía mucho

dependiendo de las zonas geográficas. Un ejemplo de esto es la zona centro del país que es donde se concentra el 70% del uso de agua y además representa el 65% de la población nacional (Donoso, 2018), aquí la disponibilidad hídrica desciende a 1.169 m³/persona al año (MOP, 2017). La UNESCO (2021) evidencia que todo esto se debe más que nada a la baja gestión de cuencas, sobre todo en sectores con escasez; en este contexto la mejora en la gestión contribuiría a la mejora de la sostenibilidad.

- **La disponibilidad y uso limitado de datos para la toma de decisiones:** Si bien este punto toma en cuenta diferentes factores a superar, como puede ser la insuficiencia de estaciones de monitoreo de calidad de agua (DGA,2020), o el bajo presupuesto para estas mismas (2,7%), lo relevante para la presente investigación está relacionado con la limitación de información debido a insuficiencia de datos de fácil acceso y lo limitado de las series de tiempo (OCDE, 2017).

Con estas 2 dimensiones en consideración, un modelo de simulación puede aportar a 2 de las 5 metas de la agenda común al 2030, apuntando a mejorar los sistemas de información sobre los recursos hídricos, así como sensibilizar la sociedad civil respecto a prácticas y tecnologías para mejorar el ahorro y empleo eficiente del agua, además de generar tanto una herramienta para mejorar la toma de decisiones, así como buscar una mayor presencia ciudadana en la misma y aportar a metas relacionadas con actualizar el marco legal vigente para adoptar e implementar el derecho humano al agua y saneamiento. Por otra parte, fortalecer el sistema de gobernanza de cuencas e invertir en infraestructura gris no convencional y verde, que incluya soluciones basadas en la naturaleza, se ven mayormente relacionados al resto de las dimensiones.

2.2.2 Ciclo del agua

Con el fin de definir el marco conceptual que se requiere para comprender el factor base que es el recurso hídrico, en Figura 7 se muestra el “Ciclo del agua”, donde se observa que el agua presenta un proceso determinado en y sobre la Tierra. En este contexto, la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2019) define el ciclo del agua como un movimiento continuo del agua dentro de la Tierra y la atmósfera, donde la misma transita entre sus diferentes estados (líquido, sólido y gaseoso) durante las etapas que componen este ciclo.



Figura 7. El ciclo del agua. (Fuente: USGS, 2019).

Las siguientes son las etapas consideradas como variables en el proceso de modelado de esta investigación, y que han sido identificadas por el U.S. Geological Survey (USGS) como componentes del ciclo del agua (en [Anexo1](#) se incluye un esquema de estas etapas):

- **Agua contenida en el hielo y la nieve:** Consiste en agua en su etapa sólida, la cual se presenta en condiciones de baja temperatura principalmente en suelo congelado, montañas en alturas con ambiente térmico frío, en nieve y glaciares. Estos entornos reciben el agua y la pueden almacenar durante largos periodos, según las condiciones de temperatura.
- **Agua contenida en la atmósfera:** Es el medio por el cual el agua se transporta por el planeta Tierra. Siempre hay presencia de agua en la atmósfera y el caso más visible es el agua en las nubes; el aire puro también presenta partículas de agua, pero a un nivel imperceptible para el ojo humano.
- **Agua contenida en los océanos:** Es la mayor cantidad en comparación a las otras etapas del ciclo del agua en movimiento. En esta etapa se almacena para luego pasar principalmente a la atmósfera en la etapa de evaporación.

- **Precipitación:** Corresponde al agua liberada desde las nubes en forma de lluvia, principalmente, pero también puede ser aguanieve, nieve o granizo. Este es el principal método por el cual el agua retorna a la Tierra.
- **Escurremientos de agua a ríos:** Proceso en el cual parte de la lluvia, o deshielo que no ha sido filtrado por el suelo, fluye desde las montañas hacia los ríos.
- **Filtraciones:** Corresponde a cuando una porción de precipitaciones y nieve se filtra como agua en el subsuelo.
- **Escurreimiento de agua subterránea:** Corresponde al flujo de agua que ha sido filtrada desde ríos, lagos, etc., y que fluye hacia el océano.
- **Agua subterránea almacenada:** Corresponde a agua que se filtra a través del suelo, ya sea por medio de precipitaciones, o desde fuentes de agua como pueden ser los ríos, lagos, entre otros.
- **Evaporación:** Es el principal método por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso. El calor es necesario para se produzca esta etapa, en la cual el agua en forma de vapor se eleva a la atmósfera.
- **Sublimación:** Corresponde al proceso en el cual el agua en las montañas, que se encuentra en estado sólido, pasa directamente al estado gaseoso.
- **Desublimación:** Corresponde al proceso en el cual el agua, que se encuentra a la altura de las montañas en estado gaseoso, pasa directamente a estado sólido.
- **Escurreimiento de la superficie:** Corresponde al flujo de agua proveniente de ríos fluyendo hacia el océano.
- **Evapotranspiración:** Consiste en 2 procesos diferentes, corresponde a la evaporación desde el suelo, además de la transpiración del agua desde las hojas de las plantas que la han absorbido previamente.
- **Condensación:** Proceso en el cual el agua en la atmósfera, que se encuentra en estado gaseoso e imperceptible al ojo humano, se transforma en nubes debido a las bajas temperaturas.

En base al comportamiento de su ciclo, existen diferencias en las proporciones de agua que se distribuyen en la Tierra. Esta distribución de valores aproximados se puede observar en la Figura 8, donde se puede apreciar que solo un 2,5% del agua en la Tierra es agua dulce, por lo que se considera que el agua disponible para consumo humano es escasa en proporción a la totalidad en el planeta.

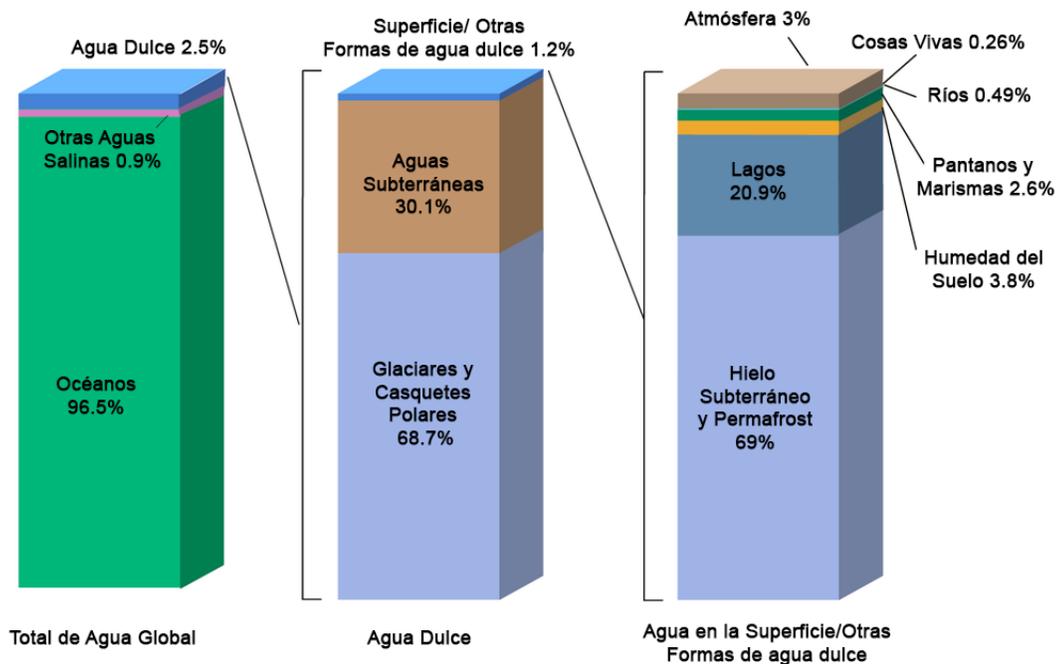


Figura 8. Distribución del agua en el planeta. (Fuente: Shiklomanov, 1993).

2.2.3 Tipos de uso de agua

Si bien el ciclo del agua es un sistema bastante complejo y dinámico, en el cual existen un gran número de procesos y variables, es importante conocer cómo los humanos afectan al mismo, dado que la vida humana está estrechamente ligada al uso de este recurso a través de la generación de energía, la producción de alimentos, la industria, entre otros. Cabe destacar que la agricultura, la minería y la industria manufacturera, representaron casi el 80% de las extracciones consuntivas totales del país en 2017 (DGA, 2017).

Dado que la región del Maule se caracteriza principalmente por la producción agrícola, es necesario centrarse en el consumo humano en esta industria. En este sentido, se estima que el nivel de consumo de agua en la agricultura a nivel nacional es de un 81.6% del uso total de agua (DGA, 2015). Se sabe que, a través de las nuevas tecnologías y técnicas, la eficiencia en el uso de agua se ha logrado aumentar de forma parcial, sin embargo, aún se cataloga como un sistema ineficiente, dado que el retorno económico por unidad de agua utilizada en la industria agrícola sigue siendo baja (Donoso, 2018).

Al estar presente en los diversos entornos y elementos del planeta, este indicador genera un gran apoyo en el análisis de escenarios para parte de individuos, empresas o gobiernos. Según en el contexto a analizar, la huella hídrica adquiere su unidad de medida correspondiente, esto ayuda a comprender los fines del consumo del recurso hídrico, y su principal impacto es indicar cuándo y dónde se obtiene el agua (Hoekstra et al., 2011).

Hoekstra et al. (2011), creadores del concepto de huella hídrica, indican que "*El interés en la huella hídrica se basa en el reconocimiento de que los impactos humanos en los sistemas de agua dulce pueden vincularse en última instancia con el consumo humano, y que problemas como la escasez de agua y la contaminación pueden entenderse y abordarse mejor considerando la producción y las cadenas de suministro en su conjunto*".

Según el uso del recurso hídrico en procesos, productos o servicios, se define como directo e indirecto: la huella hídrica directa es el agua utilizada directamente por el individuo, mientras que la huella hídrica indirecta es la suma de las huellas hídricas correspondientes a los productos consumidos.

Según SABMiller y WWF (2009), la huella hídrica considera tres componentes:

- **Huella hídrica verde:** que corresponde al agua proveniente de las precipitaciones. Esta es relevante en los productos agrícolas, hortícolas y forestales.
- **Huella hídrica azul:** es el agua que ha sido obtenida de cuencas superficiales o acuíferos subterráneos. Esta se evapora, se incorpora a un producto o se toma de un cuerpo de agua, para ser devuelto a otro o en un momento diferente. La huella hídrica azul, se ve presente en los regadíos, la industria y el uso doméstico.
- **Huella hídrica gris:** es la cantidad de agua dulce que se requiere para asimilar los contaminantes con el fin de cumplir con los estándares específicos de calidad de agua. Esta considera las situaciones de contaminación directa del recurso de agua dulce, como también las contaminaciones sufridas de forma indirecta en este recurso.

Para el desarrollo de esta investigación, el uso de la huella hídrica como indicador en el análisis aporta en la contextualización de la intensidad hídrica agrícola, con el fin de medir el uso consuntivo del agua y generar mayor certeza en el modelo propuesto.

2.2.5 Balance Hídrico

El estudio del balance hídrico se basa en el principio de conservación de masas, comúnmente conocido como ecuación de la continuidad. Esta ecuación establece que ha determinado volumen arbitrario durante x periodo de tiempo, la diferencia entre entradas y salidas será influenciada por la variación del volumen de agua almacenada (UNESCO, 1981).

La ecuación del balance hídrico, en zonas, cuencas naturales o masas de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo, junto con la variación del volumen de agua almacenada en la ubicación definida. Esta técnica implica mediciones en almacenamientos y flujos del agua, no obstante, ciertas mediciones son eliminadas en función del volumen y periodo de tiempo utilizados para el cálculo del balance hídrico (UNESCO, 1971).

De forma general, las entradas en esta ecuación del balance hídrico corresponden a la precipitación en forma de lluvia o nieve, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde el exterior.

En cambio, las salidas incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua determinada.

La relación entre entradas y salidas es inversamente proporcional, ya que, cuando las entradas son mayores a las salidas, el volumen de agua almacenada aumenta, en cambio cuando las salidas son mayores el comportamiento en el volumen de agua almacenado es el contrario, disminuyendo.

En base a lo anterior, se considera que el cálculo del balance hídrico consiste en cuantificar los flujos de entrada y salida de una zona determinada (cuenca o masa de agua), así como también el consumo y retorno que ocurre en el interior de esta zona; todo esto con el fin de obtener la variación del volumen de agua durante el intervalo en el cual se han cuantificado los flujos.

2.2.5.1 Variantes en forma de la ecuación

Según el cálculo en cada aplicación, la ecuación puede ser simplificada o aumentada en complejidad, esto depende de la disponibilidad de datos, el tipo de masa de agua, el objeto de

cálculo, las dimensiones de la masa hídrica, las características hidrográficas e hidrológicas, el periodo de duración del balance determinado, y la fase del régimen hidrológico (crecida, baja crecida) seleccionada para el cálculo de este balance.

2.2.5.2 Consideraciones

Según lo determinado en la guía de “Métodos de cálculo del balance hídrico” (UNESCO, 1981), se considera que la ecuación del balance hídrico se puede calcular respecto a cualquier intervalo de tiempo, pero se debe hacer distinción entre balances medios y balances de periodos determinados (balances operacionales).

Los balances medios se calculan comúnmente respecto a un ciclo anual (año calendario o año hidrológico), pero también está la opción de realizar balances medios respecto a una estación o mes. Este tipo de balance hídrico se considera más simple, al existir la posibilidad de no considerar la variación del volumen de agua almacenada en la cuenca debido a la alta dificultad respecto al cálculo y medición de esta variable. En periodos largos de tiempo, los incrementos del agua almacenada a escala anual tienden a equilibrarse y su valor neto final puede considerarse igual a cero.

Al contrario, en balances hídricos de cortos periodos, a menor intervalo de tiempo mayor precisión requiere la medida y determinación del componente del balance hídrico, resultando en una ecuación de mayor complejidad y de difícil ajuste aceptable.

2.2.5.3 Pérdidas Evapotranspirativas

El flujo de vapor de agua desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas hacia la atmósfera corresponden a la evapotranspiración. Estos flujos evapotranspirativos se consideran un elemento fundamental en el proceso de balance hídrico debido a que representan la conexión entre los procesos de la superficie terrestre con la dinámica atmosférica (Liu et al., 2016).

La evapotranspiración es resultante de interacciones complejas entre factores físicos, estos determinados principalmente por factores climáticos, composición y estado del suelo y condiciones de la cobertura vegetal presente. La literatura a determinado dos conceptos principales para separar los componentes forzantes de la evapotranspiración, los cuales son evaporación potencial (ETP) y evaporación de referencia (ETo).

La ETP se define como la máxima tasa de evaporación en condiciones óptimas de la vegetación y sin restricción de agua. En cambio, la evaporación de referencia se introdujo con el fin de estudiar la demanda evapotranspirativa de la atmosfera, independiente del desarrollo, tipo y prácticas de manejos de los cultivos (FAO, 2006).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el trabajo realizado para el desarrollo del modelo, el cual se divide en tres secciones, abordadas en base a los estándares indicados por Schaffernicht (2006). La primera sección describe las fases y recomendaciones de autores para un correcto proceso de modelado, en la segunda sección se indican las fuentes de información con las cuales se alimentan las variables del modelo y la última sección corresponde a la documentación del modelo desarrollado.

3.1 Fases del proceso de modelado

En primera instancia hay que remarcar que, en el proceso de realizar el modelo de dinámica de sistemas, se ha tenido que tomar en cuenta las fases que según Sterman (2000) caracterizan un modelo de tipo cuantitativo, las cuales son:

- *Problematizar*: Consiste en definir el problema y posible comportamiento que abordará el modelo.
- *Conceptualizar*: Consiste en definir las variables y sus conexiones, del sistema a analizar, donde existen 3 tipos principales de fuentes de información (experiencia, fuentes escritas y datos numéricos).
- *Cuantificar*: Consiste en generar una estimación de las funciones que enlazan las variables.
- *Validar*: Consiste en declarar de qué forma comprobamos que el sistema representado en el modelo es confiable.
- *Experimentar*: Consiste en realizar simulaciones con la finalidad de averiguar la sensibilidad del modelo.

3.1.1 Definición del problema

Con fin de determinar el propósito del modelo a desarrollar, como primera fase se recomienda plantear una serie de preguntas. “*Si un modelo debe permitir elaborar respuestas, entonces el primer paso imprescindible es definir muy claramente cuál es la pregunta*” (Schaffernicht, 2006).

En principio, para lograr esta perspectiva, se consideraron las siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el problema a resolver?
- ¿Cuál es la pregunta a resolver?

Luego para obtener una mirada más específica, En base a las recomendaciones de Sterman (2000) enfocadas en *propósito, conveniencia y frontera* del modelo, se consideraron las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el propósito del modelo?
- ¿Cuál es la frontera?
- ¿Están los ítems importantes siendo tratados de manera endógena?
- ¿Qué variable importante ha sido asumida como exógena o excluida?
- ¿Se ha excluido a variables por falta de datos “duros”?
- ¿Cuál es el horizonte de tiempo relevante?
- ¿El modelo contiene las entidades que pueden cambiar de manera significativa en este periodo?

3.1.2 Elaboración de modelo conceptual

Luego de definir el propósito del modelo en la fase anterior, se buscó una aproximación a la estructura del modelo, por medio de un diagrama de bucle causal, relacionando los conceptos que influyen en la problemática abordada de forma inicial.

Debido a que el diagrama de bucle causal se considera menos riguroso en la literatura al requerir menor conocimiento técnico respecto a otro tipo de diagramas, y buscando potenciar la rigurosidad en el proceso de modelado, luego de la creación del diagrama de bucle causal, se procedió a la creación de un diagrama tipo “stock-and-flow”.

El diagrama de “stock-and-flow” comúnmente conocido como “diagrama de Forrester” posee un grado de formalización mayor, al permitir la cuantificación en sus variables a diferencia del diagrama de bucle causal que generalmente se enfoca en el proceso de conceptualización. El diagrama de Forrester considera la representación de los conceptos de Flujo y Acumulador,

los cuales, en base a los significados presentados por Schaffernicht (2006), se determinan como:

- Flujos (Flow): La función de los flujos en el diagrama de “stock-and-flow” es que contienen cantidades de algún elemento del cual se conoce la unidad de medida. Se considera un elemento pasivo al recibir la información que entra y además dejar salir la de salida, presentando un comportamiento de repositorio temporal en ambas instancias.
- Acumuladores (Stock): los acumuladores son los que generan cambios en los niveles. Presentan la misma unidad de medida de los niveles asociados, pero en base a periodos definidos.

Para realizar de manera óptima esta fase se tomó en consideración lo recomendado por Forrester (1961), que consiste en:

- Identificar todos los factores que se creen importantes.
- Preservar la estructura circular de las retroalimentaciones.

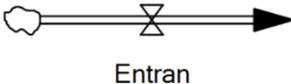
3.1.3 Cuantificación de modelo

En esta fase se realizó un proceso de cuantificación para conseguir un modelo formal. Esto consistió en intentar recrear un sistema real a través del uso de variables auxiliares, de nivel y sus respectivos flujos, de forma que las relaciones que tengan cada una de estas variables se asemejen el máximo posible a una situación. Así, una vez añadidas las ecuaciones y valores respectivos a cada variable, los resultados representarán una situación real y estarán expresados en la misma unidad de medida. En esta fase se consideraron las siguientes recomendaciones de Forrester (1961):

- Representar la distorsión de la información.
- Representar los retardos (las demoras).
- Cada variable debe referirse a una entidad identificable en el mundo real.
- La unidad de medida de la variable deberá ser la de la entidad real.
- Distinguir cantidades actuales de cantidades conocidas.
- No suponer a priori que el sistema es estable o lineal.

A fin de facilitar la comprensión del modelo desarrollado se presenta la Tabla 1, en la cual se definen las principales estructuras presentes en el modelo junto con su simbología.

Tabla 1. Símbolos para diagramas de acumulador y flujo (Schaffernicht, 2006)

Nombre	Símbolo	Significado
Acumulador (Stock)		Contienen cantidades de cierto elemento y se identifica su unidad de medida. Poseen carácter pasivo y su función es de repositorio temporal entre el momento de entrada y salida.
Flujo (Flow)		Generan los cambios en los niveles, poseen la misma unidad de medida de los niveles que afectan, pero funcionan respecto a x periodo.
Convertidor/Auxiliar		Corresponde a una entidad “auxiliar” su función es transformar la información entrante en nueva información. Permite visualizar los diferentes pasos en la transformación de información, esto favorece la discusión abierta al potenciar la claridad respecto a los pasos y además simplifica cada una de las fórmulas.
Flujo de información		Permite a un convertidor o a una variable de flujo visualizar la información respecto de la cantidad de otra variable.
Fuente/Destino		En la fuente o “nube” es donde la información entra al sistema y donde se dirigen cuando salen de este. Esto permite la “conservación de la materia” considerando que la información viene de alguna parte y se dirige a alguna parte.

3.1.4 Validación de modelo

Respecto a la validez del modelo, se consideraron los criterios recomendados por Sterman (2000), que son:

a. *Robustez y sensibilidad respecto de supuestos*: esto considera variaciones y el comportamiento del modelo ante estas. Así, se llevaron a cabo pruebas con la finalidad de evaluar el modelo antes variaciones extremas o plausibles. Aquí se consideraron las siguientes preguntas:

- ¿El modelo es robusto respecto de variaciones extremas en los valores de “input” o en las políticas de decisión?
Si, el modelo acepta valores extremos, y así mismo genera un comportamiento de acuerdo a los valores ingresados.
- ¿Las recomendaciones derivadas, son sensibles respecto a variaciones plausibles en los supuestos, valores de parámetros, agregación y fronteras?
Si, el modelo esta desarrollado de forma que independiente de los valores ingresados dentro de las distintas variables este pueda responder a esos parámetros y brindar un resultado, siendo solo en algunos casos(variables) limitado a valores mínimos estimados.

b. *Pragmatismo y uso del modelo*: esto implica un análisis en cuanto a documentación, tipos de datos, descripción y reproductibilidad de los resultados, es decir, la vinculación entre la práctica y la teoría. En este criterio se consideraron las siguientes interrogantes planteadas por el autor:

- ¿Se documentó el modelo?
- ¿Se puede usar el modelo en su computador?
- ¿Qué tipos de datos se usaron para desarrollar y probar el modelo?
- ¿Los resultados son reproductibles?
- ¿Los modeladores han usado algún artefacto (no documentado) para obtener sus resultados?

3.1.5 Explotación de modelo

Con el propósito de realizar experimentos de cambio, se determinó someter el modelo a series de simulaciones con diferentes escenarios de cambio en sus variables para así evaluar la sensibilidad.

De acuerdo con la problemática analizada en esta memoria, se definió realizar simulaciones de los escenarios obtenidos desde el modelo en los siguientes periodos de tiempo: 2030, 2040 y 2050.

3.2 Fuentes de datos

Para obtener la información de los datos asociados a las variables del modelo, se utilizaron fuentes de información de uso público, principalmente de instituciones gubernamentales y bases de datos asociadas, y ONGs dedicadas al estudio hídrico e informes de balance hídricos de uso público.

3.2.1 Balance Hídrico Nacional

Debido a la necesidad de obtener data asociada a las variables determinadas en el modelo de simulación, se ha considerado la información recopilada en el Balance Hídrico Nacional de la Dirección General de Aguas. Este documento es utilizado por las entidades gubernamentales en Chile con el fin de evaluar a nivel nacional la disponibilidad hídrica. La versión consultada en esta memoria es el informe final de “Actualización del Balance Hídrico Nacional” realizado por la Universidad de Chile en conjunto de la Pontificia Universidad Católica de Chile, de octubre del 2017.

Según lo presentado en el documento mencionado, se consideraron tres mecanismos como fuente de información: a) observaciones puntuales (in situ), b) percepción remota y c) reanálisis climáticas.

Respecto a las Observaciones in situ, los procesos físicos relacionados al balance hídrico se diferenciaron en cuatro grandes grupos, que fueron: mediciones

hidrometeorológicas, mediciones de aguas subterráneas, mediciones en nieve y glaciares, e información de infraestructura. En estos cuatro grupos, el periodo de estudio fue de 1985 al 2015.

- **Mediciones Hidrometeorológicas:** Corresponden a las mediciones respecto a una cuenca hidrográfica en las cuales el nivel de instrumentación permite cuantificar forzantes meteorológicas del balance hídrico y caudales. En esta medición se consideraron las variables precipitación, caudal, temperatura, humedad relativa, evaporación, radiación y velocidad del viento obtenidas.

- **Mediciones de aguas subterráneas:** Descripción de la actual red de monitoreo piezométrica, a través de un análisis de disponibilidad de niveles piezométricos y la distribución de la red de monitoreo de niveles de agua subterránea de la DGA. Contemplando 32 cuencas hidrográficas representativas, estos datos fueron recopilados desde la plataforma virtual de la DGA (Banco Nacional de Aguas – BNA).

- **Mediciones de nieve:** Debido a las variantes propiedades de la nieve, para efectos del balance hídrico se consideró la existencia de mediciones de profundidad como de equivalente en agua de nieve (pasando por la densidad).

- **Mediciones en glaciares:** Este proceso se realiza por medio de la instalación de estaciones meteorológicas y/o balizas para medir la meteorología en los glaciares y el derretimiento alcanzado durante una temporada de ablación. Sin embargo, debido a que los periodos de registro obtenidos de las estaciones existentes son muy cortos, los autores del informe de balance hídrico nacional no pudieron incorporar estas mediciones al no poseer según su criterio, la robustez necesaria.

- **Evapotranspiración:** La evapotranspiración corresponde a la suma de los flujos de vapor de agua hacia la atmósfera desde la superficie del suelo (evaporación) y la traspiración de las plantas. Esta variable es un componente fundamental del ciclo hidrológico.

Dentro del informe de balance hídrico nacional (DGA, 2016), en su marco de estudio, se considera la evaporación como el proceso de conversión y transferencia de agua líquida desde una superficie hacia la atmósfera en forma de vapor. La transpiración por su parte corresponde

al proceso de transporte activo controlado por la vegetación, en el cual el agua es transportada en su forma líquida desde el suelo y liberada en forma de vapor hacia la atmósfera por los tejidos vegetales de la planta. Ambos procesos ocurren de forma simultánea y en general es complejo distinguirlos de forma separada.

3.2.1 Consideraciones en selección de datos

Durante el proceso de buscar y seleccionar datos, con tal de que no hubiera problema alguno al momento de extraerlos o hubiera un déficit de información respecto a las variables utilizadas en el modelo, se utilizó una tabla elaborada por la Dirección General de Aguas (Tabla 2) donde se presentan 3 aspectos a tomar en consideración al momento de elegir. En primer lugar, el ranking elaborado por la Dirección General de Aguas en cuencas de interés estratégico para la institución, en segundo el nivel de información disponible y por último un ranking de patrones en base a una ponderación de 7 criterios (DGA, 2016b).

Tabla 2. Comparación de nivel de prioridad para la aplicación de la metodología del balance hídrico en macrozona centro

N°	Código Cuenca	Nombre Cuenca	Ranking DGA	Ranking Información	Ranking Patrones
14	54	Río Aconcagua	1	2	1,61
15	57	Río Maipo	1	1	1,28
16	60	Río Rapel	2	2	1,63
17	71	Río Mataquito	3	2	2,53
18	73	Río Maule	1	1	1,84

Así mismo con tal de no tener problemas al momento de obtener valores sobre el caudal a analizar, se tomó en cuenta un análisis de los derechos de agua otorgados en las 32 cuencas del Atlas del Agua (DGA, 2016), donde estas están divididas entre aquellas que poseen o no coordenadas, y a su vez, los derechos que poseen se dividen entre consuntivos, superficiales, consuntivos subterráneos y no consuntivos. En la Tabla 3 se presentan 5 de las 32 cuencas mencionadas, las cuales son pertenecientes a la macrozona central.

Tabla 3. Derechos de agua asociados a cada cuenca en macrozona centro, DGA (2016)

Cuenca	Código cuenca	Con Coordenadas			Sin Coordenadas		
		Consuntivo		No Consuntivo	Consuntivo		No Consuntivo
		Superficial	Subterráneo		Superficial	Subterráneo	
Río Aconcagua	54	210	3.154	49	855	573	39
Río Maipo	57	559	4.886	164	1.302	1.725	119
Río Rapel	60	444	4.729	170	702	288	70
Río Mataquito	71	127	1.046	185	238	167	13
Río Maule	73	2.437	2.080	367	978	385	46

En cuanto a lo que refieren los derechos de agua, según lo dispuesto en el texto del Código de Aguas de Chile, se determina que los derechos de aprovechamiento del agua son del tipo real, respecto a su uso y goce temporal. Estos derechos se obtienen a través de una concesión.

Los derechos de agua se expresan en volumen por unidad de tiempo y son de dos tipos, consuntivos o no consuntivos. El derecho de aprovechamiento consuntivo corresponde al derecho que otorga al titular la facultad de consumir totalmente el recurso hídrico en cualquier actividad; en cambio, el derecho de agua no consuntivo solo permite la utilización del agua sin su consumo y con el deber de restituir el recurso hídrico según lo estipulado en el acto de la adquisición o constitución del derecho otorgado.

3.3 Documentación

Debido a la necesidad de facilitar la futura manipulación del modelo, se realizó una documentación de este, tomando en consideración que:

- Otras personas deben poder repetir el estudio y llegar a los mismos resultados, en base a la documentación.

- El modelo y la documentación deberían ser públicamente accesibles (si no hay restricciones comerciales o de seguridad).
- Todas las personas involucradas en el proyecto y afectadas por sus resultados, deben poder acceder al modelo y a la documentación.

Con ello se logra una documentación que permite a los futuros usuario lograr comprender correctamente el modelo, además de no generar inconvenientes a futuros modeladores.

Debido a lo mencionado anteriormente, en el [Anexo IV](#) se adjunta el modelo en formato de tabla que incluyen la documentación de las variables asociadas al modelo desarrollado, considerando el tipo de variable, su nombre y la descripción de la misma.

CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo son presentados los resultados obtenidos en la investigación, de acuerdo con la metodología planteada.

4.1 Modelo de Dinámica de Sistemas

El proceso de desarrollo del modelo implica añadir o quitar variables constantemente en función de que estos sean medibles, además de la disponibilidad de los datos y el nivel de relación entre estos. Uno de los factores más importantes en el desarrollo del modelo desarrollado es el nivel de interacción que tiene el ser humano con algunas variables, siendo un claro ejemplo de esto el consumo doméstico y la producción de alimentos, que dependen completamente de cada individuo.

Es importante señalar que el humano también afecta al uso del agua en otras dimensiones, además del consumo doméstico o la producción de alimentos, como puede ser a través de la retención de los recursos hídricos por hidroeléctricas. Esto último más que consumo actúa como un retraso en un escenario real y no se puede medir de forma objetiva cómo esto afectaría al ciclo del agua. Asimismo, se puede considerar el uso de agua por parte de las industrias que actúan como un tipo de agente, pero del que no existe gran detalle sobre la cantidad de consumo realizada.

En la Figura 10 se puede observar el modelo final de la presente memoria, donde, como se mencionó anteriormente, existen variables que dependen completamente del factor humano, como pueden ser el consumo doméstico, la eficiencia (ya sea en el riego, al producir alimentos o al reponer agua a través de una planta de tratamiento), la población. etc. También existen variables como la temperatura que, si bien no dependen del ser humano, son interesantes de incluir para mostrar cómo interactúan con las demás partes del modelo, ya que siendo el modelo un ciclo cerrado, aunque parezcan lejanas, las implicancias entre algunas variables tendrán ciertos efectos en el modelo.

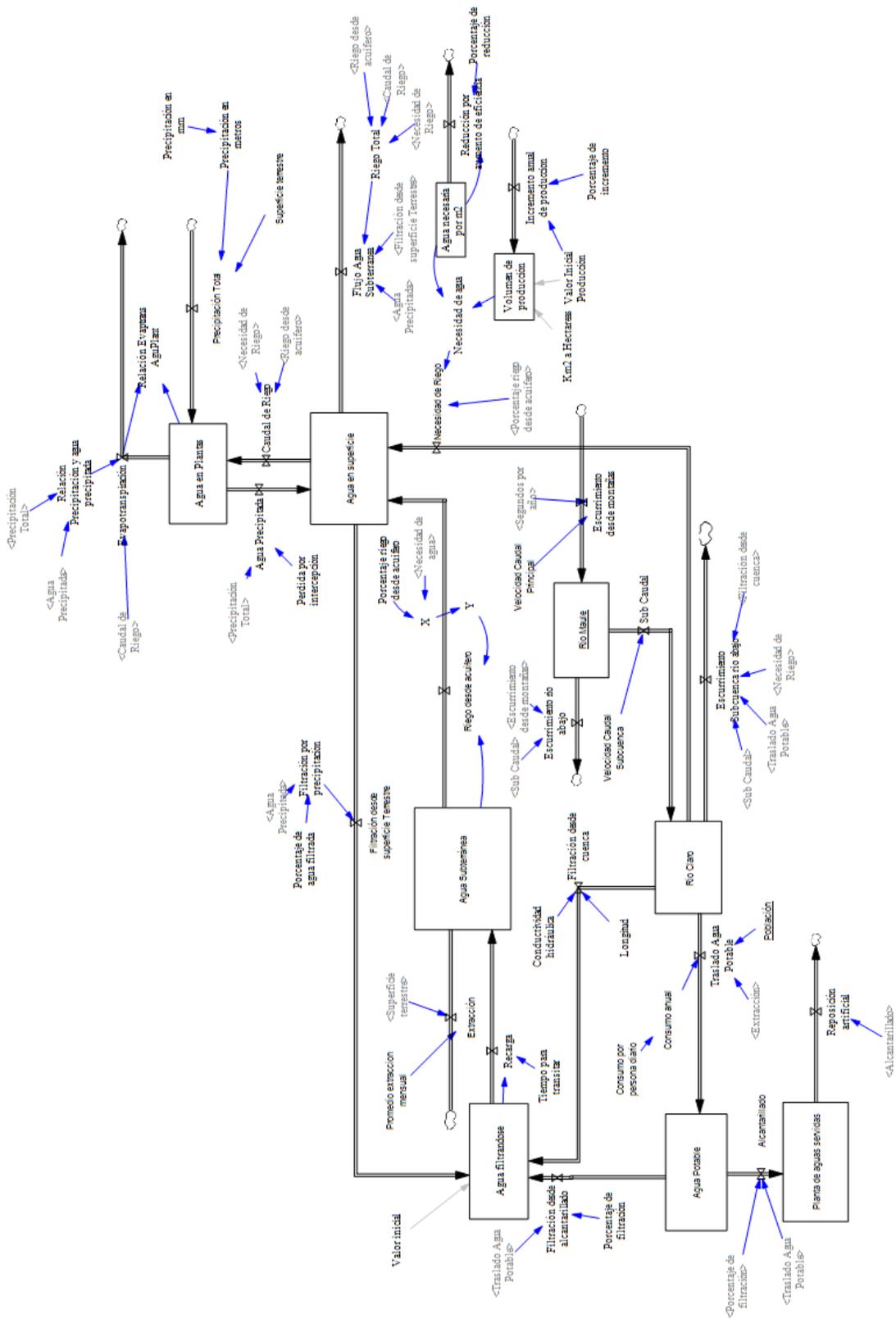


Figura 10. Modelo final interacción humano – ciclo del agua (Elaboración Propia en base a DGA, 2017)

Cabe destacar que muchas variables de los modelos iniciales (Anexo II y Anexo III) no están presentes en el modelo final, lo cual se debe al cambio de enfoque en cuanto a la forma de medir la cantidad de agua en las distintas variables, considerando que los modelos iniciales se basaron en la investigación específica de las distintas variables que componen el ciclo del agua, junto a investigaciones sobre consumo humano, para finalmente llegar al enfoque basado en la metodología del balance hídrico.

4.1.1 Definición de problema

A continuación, se exponen la respuesta a las preguntas planteadas en la definición del problema a modelar:

- *¿Cuál es el problema a resolver?*

No hay presencia de modelos de simulación, basados en dinámica de sistemas, sobre los elementos que influyen en la crisis hídrica en Chile.

- *¿Cuál es la pregunta a resolver?*

Con la situación hídrica actual del país, ¿Cuáles son los escenarios hídricos en Chile al 2050?

A continuación, se responden las incógnitas respecto al *propósito, conveniencia y frontera* del modelo:

- *¿Cuál es el propósito del modelo?*

Representar escenarios futuros respecto al ciclo del agua considerando la interacción humana en los patrones de consumo de los recursos hídricos.

- *¿Cuál es la frontera?*

La frontera del modelo desarrollado corresponde los componentes del ciclo del agua, pero con datos asociados a la zona de estudio, que en este caso corresponden a una subcuenca perteneciente a la comuna de San Clemente.

- *¿Están los ítems importantes siendo tratados de manera endógena?*

Sí, están siendo tratados de manera endógena debido al requerimiento de que el modelo sea similar en comportamiento al sistema real.

- ¿Qué variable importante ha sido asumida como exógena o excluida?
El agua en nubes y el agua en mar debido a que, si bien forman parte del ciclo del agua, no es posible ajustar estas variables a un espacio determinado como es requerido al abordar la problemática analizada.
- ¿Se ha excluido a variables por falta de datos “duros”?
Sí, pero se han tomado alternativas para las variables excluidas buscando no generar distancia del sistema real, además se han simplificado otras variables en favor de una búsqueda de un comportamiento racional del modelo.
- ¿Cuál es el horizonte de tiempo relevante?
El horizonte de tiempo relevante considerado es de treinta años.
- ¿El modelo contiene las entidades que pueden cambiar de manera significativa en este periodo?
No, el comportamiento de la mayoría de las variables es constante a excepción de algunas que cambian, pero de forma lenta y paulatina.

4.1.2 Elaboración de modelo conceptual

- *Diagrama de bucle Causal*

A fin de lograr una primera aproximación a la estructura del modelo, se desarrolló un diagrama de bucle causal sobre los factores que influyen en la crisis hídrica de forma general. Esta primera estructura del modelo se puede observar en la Figura 11.

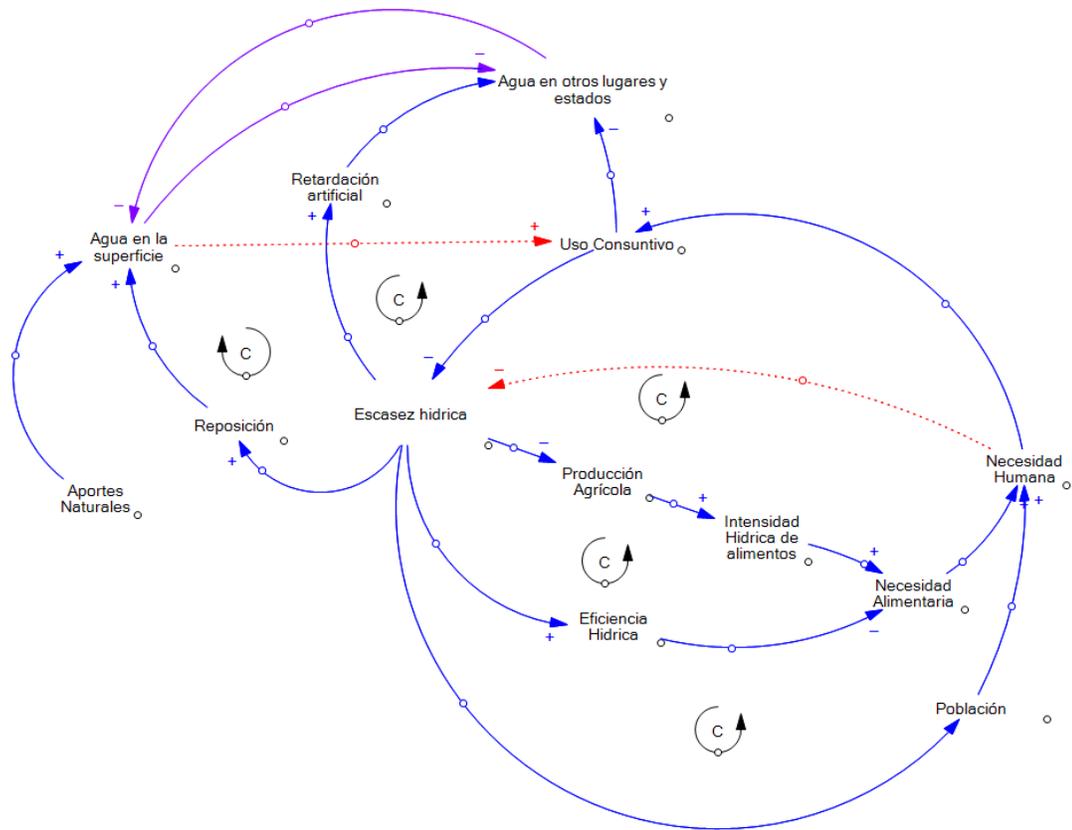


Figura 11. Modelo de bucle causal crisis hídrica (Elaboración propia, en base a Fercovic, 2019)

En el desarrollo de este modelo, se consideró lo recomendado por Forrester (1961) sobre “identificar todos los factores que se creen importantes y preservar la estructura circular de las retroalimentaciones” en la fase de elaboración de modelo conceptual.

- *Diagrama de Forrester*

A continuación, con el propósito de potenciar la rigurosidad en el proceso de modelado, además de lograr visualizar y determinar los principales flujos y acumuladores del modelo, se procedió a realizar un diagrama de “stock-and-flow” comúnmente conocido como “diagrama de Forrester”. Este diagrama se muestra en la Figura 12.

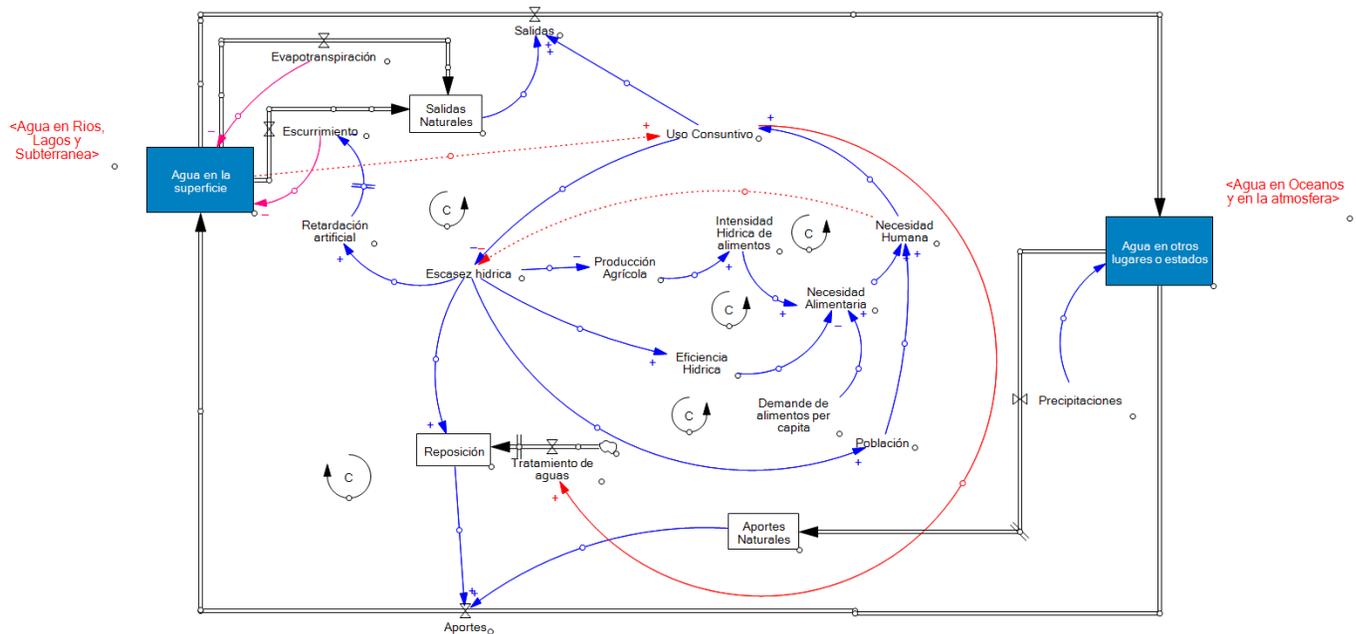


Figura 12. Diagrama de Forrester Crisis Hídrica, (Elaboración propia, en base a Fercovic, 2019)

A diferencia del diagrama anterior de bucle causal, en este “diagrama de Forrester” desarrollado se logra observar los principales flujos y acumuladores identificados como participantes en el modelado de la crisis hídrica, identificando:

Flujos (Flow):

- Aportes.
- Salidas.
- Precipitaciones.
- Evapotranspiración.
- Escorrentía.
- Tratamiento de aguas.

Acumuladores (Stock):

- Agua en la superficie.
- Agua en otros lugares o estados.
- Aportes naturales.
- Salidas Naturales.
- Reposición.

Según lo mencionado anteriormente en el capítulo de metodología, el principal comportamiento de los flujos o flows en el modelo es el de generar los cambios en los niveles en base a un periodo determinado. En cambio, los acumuladores o stock, como lo dice su nombre, cumplen con la función temporal de repositorio entre el momento de entrada y de salida.

De acuerdo a lo indicado sobre el diagrama de Forrester, el modelo presentado (Figura 12) se fue estructurando como base para un modelo donde ya estuvieran presentes variables de flujo y stock, considerando explícitamente cuales serían los flows que representarían las entradas y salidas del modelo en general, junto a las respectivas demoras que se presentan. De esta forma, se fue detallando que, si bien las salidas dependían del uso consuntivo de los humanos junto a salidas naturales, estas últimas correspondían a la evapotranspiración de las plantas y el escurrimiento hacia el océano. De esta misma forma, se detalló los aportes que correspondían a las precipitaciones y el tratamiento del agua en plantas. Las interacciones de las variables de flujo y stock en el modelo se pueden ver representadas de forma más simple en la Figura 13.

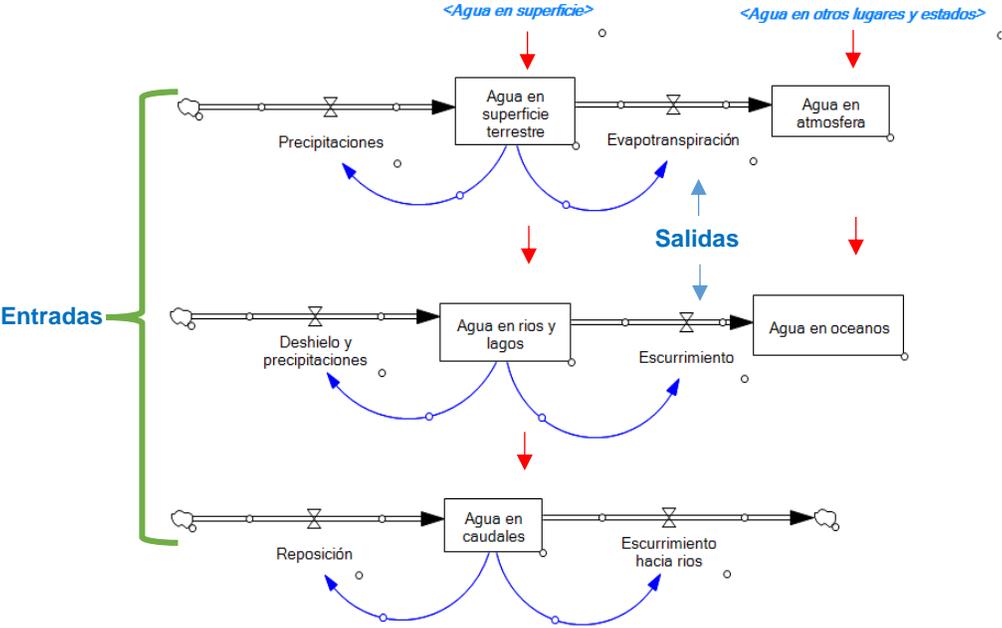


Figura 13. Representación de interacciones variables de stock & flows, elaboración propia en base al ciclo del agua.

4.1.3 Cuantificación de modelo

Si bien es importante determinar las diversas variables que forman parte del modelo, al ser este un modelo con una gran cantidad de variables, el explicar cada una sería extenso. Por esto y con la finalidad de entregar esta información de forma simple, se decidió generar modelos de árboles causales (Figuras 14 a 22), donde como base se toman las distintas variables de stock del modelo junto a sus respectivas variables constantes y auxiliares.

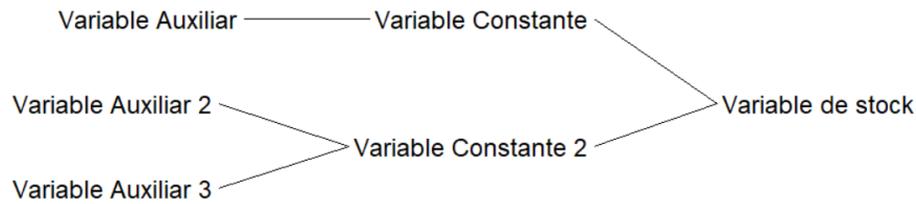


Figura 14. Ejemplo modelo árbol causal – *Elaboración propia.*

Las variables de stock o acumuladores en el modelo desarrollado junto a su árbol causal son las siguientes:

a) Agua en Plantas:

En base a lo planteado en el modelo respecto al sistema real, esta variable corresponde al agua presente en las diversas especies de plantas de la zona analizada, se determina como una variable de stock debido a que las plantas absorben el agua durante cierto periodo para luego ser transpirada por la misma.

Unidad de medida: m³



Figura 15. Árbol causal variable Agua en Plantas – Elaboración propia

Entradas:

- Caudal de riego.
- Precipitación total.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Agua Precipitada.
- Evapotranspiración.

b) Agua en superficie:

Esta variable de stock corresponde al agua que recibe la superficie de la zona analizada desde diversas fuentes.

Unidad de medida: m³



Figura 16. Árbol causal variable Agua en superficie – Elaboración propia

Entradas:

- Agua Precipitada.
- Caudal de Riego.
- Necesidad de Riego.
- Riego desde acuífero.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Filtración de superficie Terrestre.
- Flujo Agua Subterránea.

c) Agua Subterránea:

Esta corresponde al agua que se encuentra bajo la superficie terrestre de la zona analizada, se determina como stock debido al comportamiento de acumulación respecto al flujo natural del ciclo del agua.

Unidad de medida: m³

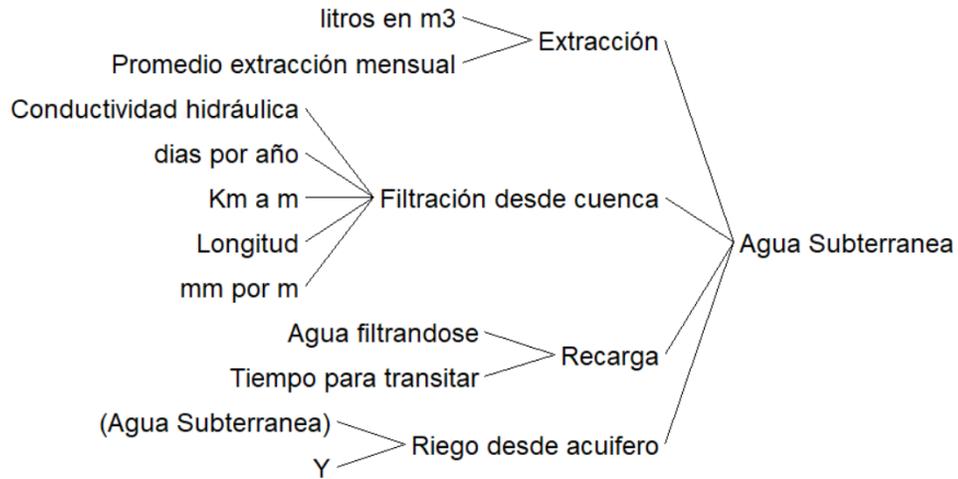


Figura 17. Árbol causal variable Agua Subterránea – Elaboración propia

Entradas:

- Filtración desde cueca.
- Recarga.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Extracción.
- Riego desde acuífero.

d) Río Maule:

Esta variable corresponde al caudal del río Maule, el cual refiere al volumen de agua que atraviesa la superficie de este río en un determinado periodo de tiempo, y se comporta como stock debido a que el río es un receptor del agua.

Unidad de medida: m³

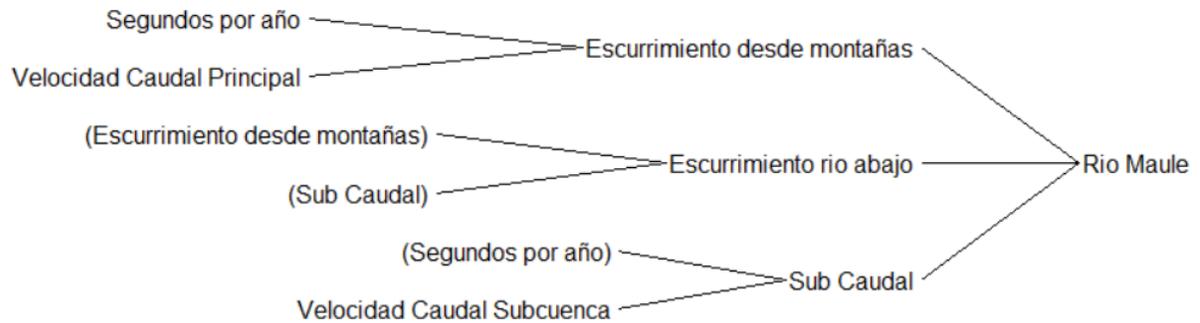


Figura 18. Árbol causal variable Río Maule – Elaboración propia

Entradas:

- Escurrimiento desde montañas.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Escurrimiento río abajo.
- Sub Caudal.

e) Río Claro:

Esta variable corresponde al caudal del río Claro, el cual corresponde al volumen de agua que atraviesa la superficie de este río en un determinado periodo de tiempo, y se comporta como stock debido a que el río es un receptor del agua.

Unidad de medida: m³

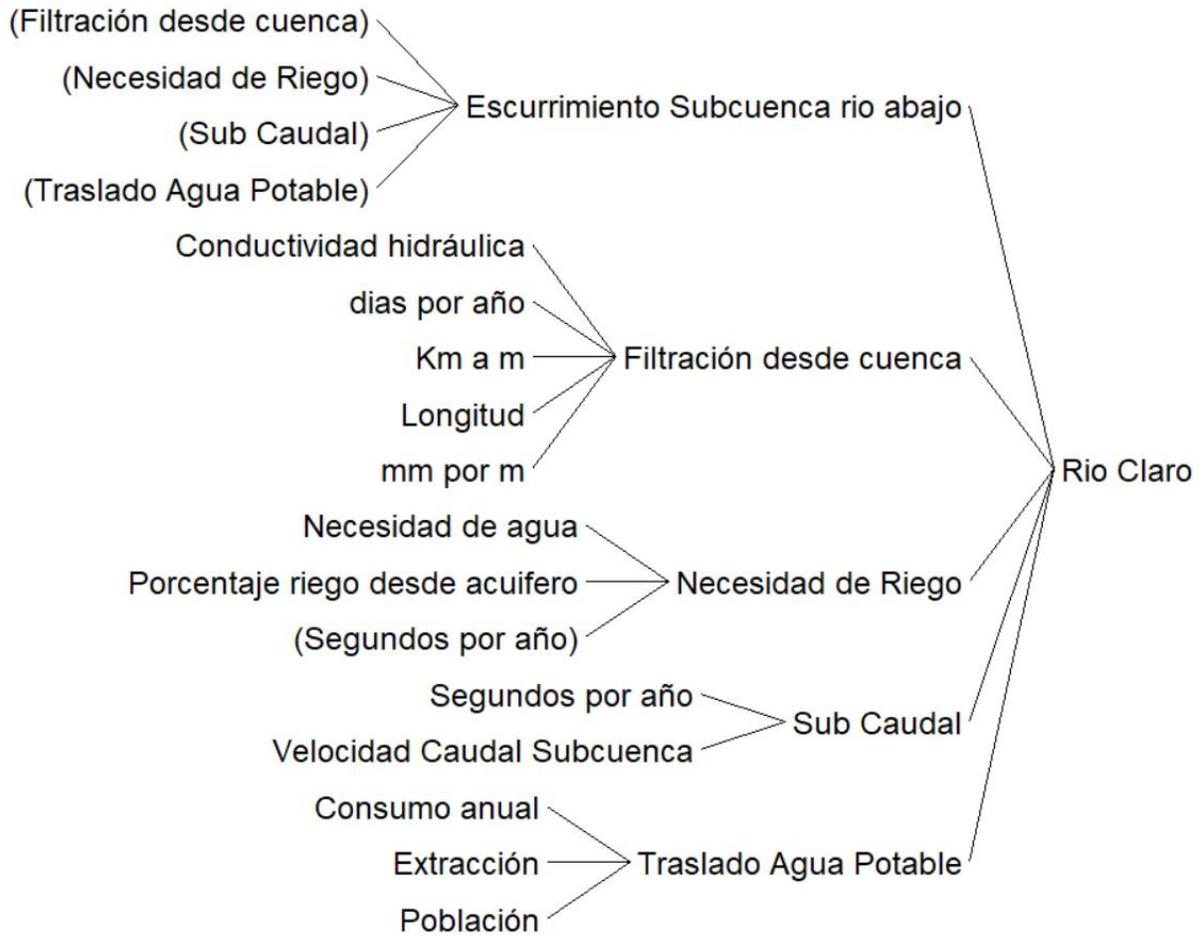


Figura 19. Árbol causal variable Río Claro – Elaboración propia

Entradas:

- Sub Caudal.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Esguerrimiento Subcuenca río abajo.
- Necesidad de riego.
- Filtración desde cuenca.
- Traslado Agua Potable.

f) Agua filtrándose:

Esta variable se refiere al agua que, por diversos motivos, se filtra desde su fuente de origen.

Unidad de medida: m³

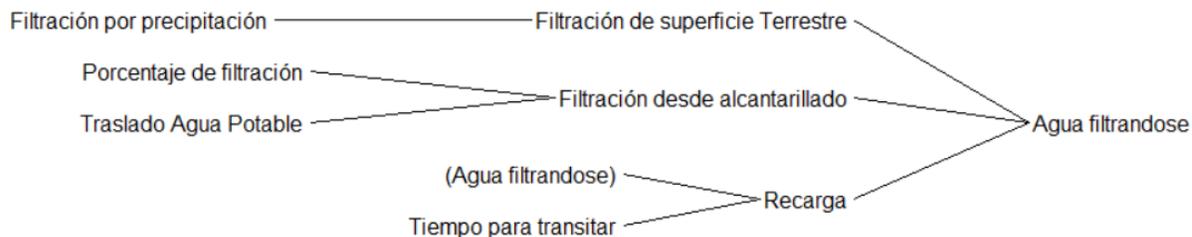


Figura 20. Árbol causal variable Agua filtrándose – Elaboración propia

Entradas:

- Filtración de superficie Terrestre.
- Filtración desde alcantarillado.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Recarga.

g) Agua Potable:

Se refiere al agua tratada para su consumo por la población.

Unidad de medida: m³

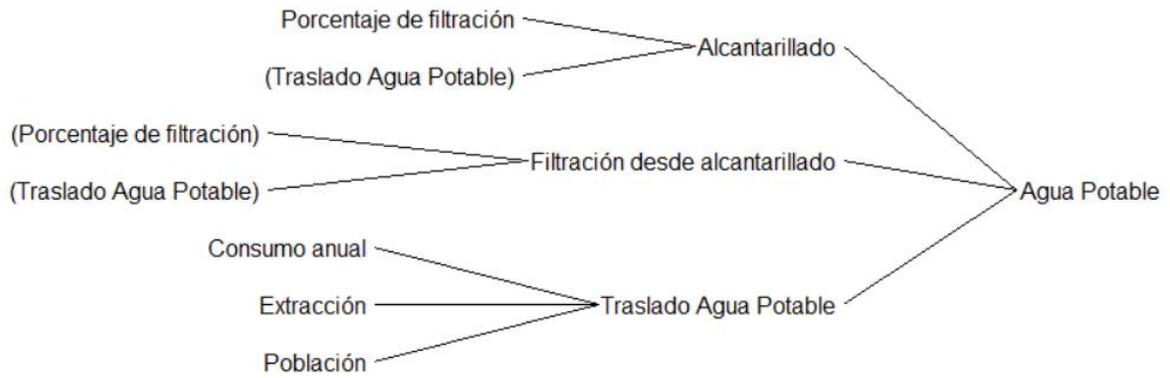


Figura 21. Árbol causal variable Agua Potable – Elaboración propia

Entradas:

- Traslado Agua Potable.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Alcantarillado.
- Filtración desde alcantarillado.

h) Planta de aguas servidas:

Esta variable se refiere a la cantidad de agua que se encuentra en proceso de tratado para su óptimo uso.

Unidad de medida: m³



Figura 22. Árbol causal variable Planta de aguas servidas – Elaboración propia

Entradas:

- Alcantarillado.

Unidad de medida: m³/Year

Salidas:

- Reposición artificial.

Cabe destacar que, si bien el modelo toma en cuenta el ciclo del agua, existen variables dentro del mismo de las cuales no existe información detallada entorno a un sector determinado, como son:

- *El agua en el océano:* si bien se puede encontrar información sobre el volumen de esta, no se puede adecuar y asociar a un sector o zona determinada como la región del Maule, además del hecho de que esta variable afecta a más de una región o país.
- *El agua en la atmósfera y agua en nubes:* si bien se pueden estimar las precipitaciones de un sector, el agua que se puede encontrar en estado gaseoso no depende directamente de una sola región, por lo que no se puede encontrar información directamente relacionada al sector de análisis, sin contar que el agua en nubes no puede actuar como un stock debido a que está en movimiento.

Un detalle de las variables presentes en el modelo se puede observar en el Anexo IV, donde se incluye su respectiva descripción que indica qué es lo que mide o representa dentro del modelo.

Es importante mencionar que, si bien el modelo está realizando para la región del Maule, los datos seleccionados para el modelo solo corresponden a una subcuenca de un sector determinado. Esto debido a que así se pudo encontrar mayor cantidad de datos y obtener una mayor exactitud en los resultados.

En cuanto a las variables referentes al recurso hídrico en el modelo, las ecuaciones del modelo se plantean en base a los informes de balance hídricos presentados por la DGA (2017), los

cuales presenta resultados basados en antecedentes dentro de un periodo de 30 años (1987-2017), a nivel de cuencas y subcuencas, utilizando la ecuación de balance hídrico.

A continuación, se plantea la ecuación de balance hídrico [1] donde a esta misma se le incorpora un término residual de discrepancia (η), que corresponde a usos de agua difíciles de cuantificar en general, extracciones ilegales, entre otras.

$$P - Q = ET - \eta \quad [1]$$

Donde P =Precipitaciones; y Q =Caudal efluente; ET =Evapotranspiración.

En esta fórmula Q considera tanto el flujo superficial de agua, como el subterráneo. Del mismo modo E toma en cuenta distintas variables como la evaporación, la evapotranspiración y las pérdidas por consumo. Se establece además que en gran parte de las cuencas se utiliza la evapotranspiración de superficies naturales.

Como fue indicado en metodología, se llevó a cabo un registro de cada uno los cambios realizados durante la construcción del modelo, ya sea añadiendo o eliminando variables, cambiando ecuaciones o relaciones entre variables. Un detalle de esto se puede ver en los anexos:

- *Anexo I*, que corresponde a un primer avance del modelo donde solo se tomó en cuenta las variables correspondientes al ciclo del agua y su flujo.
- *Anexo II*, donde ya están presentes variables que afectan a los flujos dentro del modelo.
- *Anexo III*, donde ya se comienza a tomar en consideración la interacción humana dentro del uso de recursos hídricos.
- *Anexo IV*, que muestra la documentación de las variables presentes en el modelo.

4.1.4 Validación del modelo

En la presente sección, se da respuesta a las preguntas consideradas en el capítulo de metodología respecto a la fase de validación del modelo. Estas preguntas que fueron

categorizadas en base a 2 criterios principales se muestran a continuación junto con las respuestas a sus interrogantes:

A. *Robustez y sensibilidad respecto de supuestos*

- ¿El modelo es robusto respecto de variaciones extremas en los valores de “input” o en las políticas de decisión?

Sí, el modelo acepta valores extremos, y así mismo genera un comportamiento de acuerdo con los valores ingresados.

- ¿Las recomendaciones derivadas, son sensibles respecto a variaciones plausibles en los supuestos, valores de parámetros, agregación y fronteras?

Sí, el modelo esta desarrollado de forma que independiente de los valores ingresados dentro de las distintas variables este pueda responder a esos parámetros y brindar un resultado, siendo solo en algunos casos(variables) limitado a valores mínimos estimados.

B. *Pragmatismo y uso del modelo*

- ¿Se documentó el modelo?

Sí, se adjunta la documentación del modelo en el Anexo IV.

- ¿Se puede usar el modelo en su computador?

Sí, el modelo desarrollado se inicia a través del software con el cual fue desarrollado, Vensim PLE.

- ¿Qué tipos de datos se usaron para desarrollar y probar el modelo?

Son datos de tipo cuantitativos, obtenidos a través de diversas bases de datos.

- ¿Los resultados son reproducibles?

Sí, son reproducibles, ya que es posible exportar el modelo e iniciarlo con la misma información desde otro computador con el programa Vensim PLE.

- ¿Los modeladores han usado algún artefacto (no documentado) para obtener sus resultados?

No, solamente se ha utilizado el software Vensim PLE, el cual cuenta con documentación asociada.

Adicionalmente, y con el fin de potenciar la validez del modelo desarrollado, las variables de este fueron respaldadas respecto al sistema real analizado. Esto consistió en la selección de las variables en base al análisis del conocimiento científico referente al sistema real abordado en esta memoria. Luego, la consistencia dimensional del modelo fue validado a través de la herramienta "Unit Check" del software utilizado (Vensim PLE), lo que permitió verificar si las variables afectadas por otras variables poseen la misma unidad de medida que la variable influyente. Acto seguido, se comparó el modelo respecto a los datos de referencia sin observar diferencias significantes entre ambas partes. Luego se analizó la polaridad de los valores y flujos determinando que el modelo no presenta valores o flujos negativos. Posteriormente, se estudió el comportamiento presentado por el modelo desarrollado, logrando observar una conducta racional y descartando un proceder imposible respecto al sistema real. Finalmente se comprobó la sensibilidad del modelo, es decir, si las variables del modelo son sensibles ante cambios en los datos ingresados en cada una de ellas, resultando en que sí se considera sensible el modelo.

En base a lo mencionado anteriormente en esta sección, se ratifica la validez del modelo desarrollado en esta memoria.

4.2 Recopilación de datos

Parte indispensable de la construcción del modelo constituyó la recolección de información sobre las diferentes variables de este, donde sus principales partes son sus respectivos inputs (Precipitación), outputs (Esguerrimiento - Evapotranspiración) y el agua subterránea como principal variable de stock, y asimismo las subvariables que componen a cada una.

4.2.1 Evapotranspiración

La recopilación de esta información se obtuvo desde las bases de datos del Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA), en específico de su centro climatológico ubicado en la

comuna de San Clemente, donde esta información está disponible desde el año 2019 a la actualidad, pero para efectos del modelo solo se tomó en cuenta hasta agosto del presente año (2022). En la Tabla 4 se pueden apreciar los valores de las variables anteriormente mencionadas, donde se puede observar que en si no existe una gran diferencia en la evapotranspiración total de los distintos años, e incluso realizando un análisis hasta agosto de cada año (con tal de igualar la cantidad de datos ofrecidos por el año 2022) tampoco existen grandes diferencias entre los valores observados. Esto se puede ver reflejado de mejor manera y detalle observando los *Anexos V, VI, VIII y VIII*.

Tabla 4. Evapotranspiración total de San clemente (enero 2019 – agosto 2022), INIA (2022).

Valores ET Generales							
Mes	Temperatura Min	Temperatura Max	Humedad Min	Humedad Máxima	Velocidad del viento a 2m	Evapotranspiración Total	ET Total hasta Agosto
Unidad	C°	C°	%	%	Promedio Kt	Mm/Año	Mm/Año
2019	-1.70	37.50	10.60	100.00	0.84	1012.09	558.81
2020	-1.20	35.40	0.10	100.00	0.83	1123.29	596.94
2021	-4.40	35.00	12.10	100.00	0.60	936.47	497.86
2020(enero – agosto)	-4.10	38.50	9.30	98.30	0.63		560.19
Resultados Anuales	-4.40	38.50	0.10	100.00	0.72	1023.95	

Si bien a través de está tabla se tiene a disposición la cantidad de evapotranspiración total anual, está información solo contempla la comuna de San Clemente en su totalidad, en este caso sus 4504 km² de superficie, por lo cual para efectos del modelo se tiene que reducir al espacio contemplado por la cuenca del río Claro en San Clemente, como se puede observar en la Figura 23, donde la intersección de las superficies arroja una superficie de 1169 km².

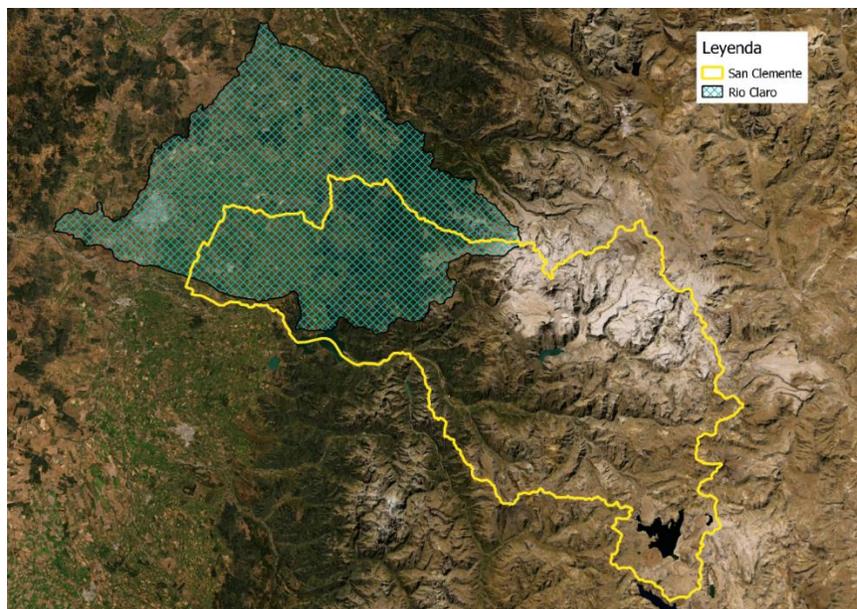


Figura 23. Intersección comuna de San Clemente – Río Claro (Elaboración Propia).

4.2.2 Escorrentía

Con el fin de conocer el valor de la escorrentía en el sector y poder determinar la cantidad de agua utilizada desde el caudal principal se hizo uso de los derechos de agua inscritos en el sector. En este caso corresponde a los derechos de uso consuntivo para riego de lo cual se obtuvieron los valores detallados en la Tabla 5; para un mayor detalle sobre la información se puede recurrir al Anexo IX donde se presenta la tabla detallada, y a los Anexo X, XI y XII donde se puede apreciar la distribución geográfica de los derechos de agua.

Tabla 5. Caudal anual promedio en base a derechos de agua, San Clemente – Río Claro (DGA, 2022)

Año	Caudal Anual Promedio (L/s)
2019	299.5
2020	34
2021	101.4
2022	121
Total	138.975

En base a estos valores, en el modelo se establece un rango de forma de establecer los límites con los cuales se va a realizar la simulación y así mismo no generar consumo excesivo que generen un error en la simulación.

4.2.3 Precipitación

Considerando que la precipitación es el principal input en el ciclo del agua, el obtener información sobre este es de suma importancia para el desarrollo del modelo. En la Tabla 6, se pueden observar los valores de las precipitaciones durante los años 2019, 2020 y 2021, donde el valor de la precipitación usado en el modelo fue de 424mm, el cual corresponde al promedio entre los valores de estos 3 años (esto se muestra de mejor forma en el Anexo XIII).

Tabla 6. Total Precipitaciones durante los periodos de 2019 -2021, Cr2 (2022).

2019	2020	2021
334mm	528mm	410mm

4.2.4 Agua Subterránea

Siendo el agua subterránea el principal indicador de una posible escasez hídrica, es indispensable para el modelo el conocer datos sobre el uso esta. Para este caso, la recopilación sobre el uso de agua se basó en los derechos de agua y uso consuntivo, entregados por la DGA y que se pueden observar en el Anexo XIV.

4.3 Simulaciones preliminares

Si bien el desarrollo del modelo se llevó a cabo en base a variables reales detalladas en la metodología de balance hídrico, esto no asegura que la simulación posterior a la finalización del modelo representase a la perfección un escenario real. Por esto y con la finalidad de tener un modelo que se ajuste lo mejor posible, se hicieron simulaciones con el fin de encontrar incongruencias, así como posibles errores que no se ven a simple vista en el modelo.

4.3.1 Primera Simulación

El modelo presentado en la Figura 24 corresponde a una simulación donde no se considera el proceso de reposición de agua llevado a cabo por los humanos a través de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Además, esta primera simulación se llevó a cabo para poder comprobar si existía un equilibrio en las diferentes variables de stock y encontrar errores o incongruencias en los valores, unidades u ecuaciones de las diferentes variables y así mismo obtener un modelo “mejor calibrado”.

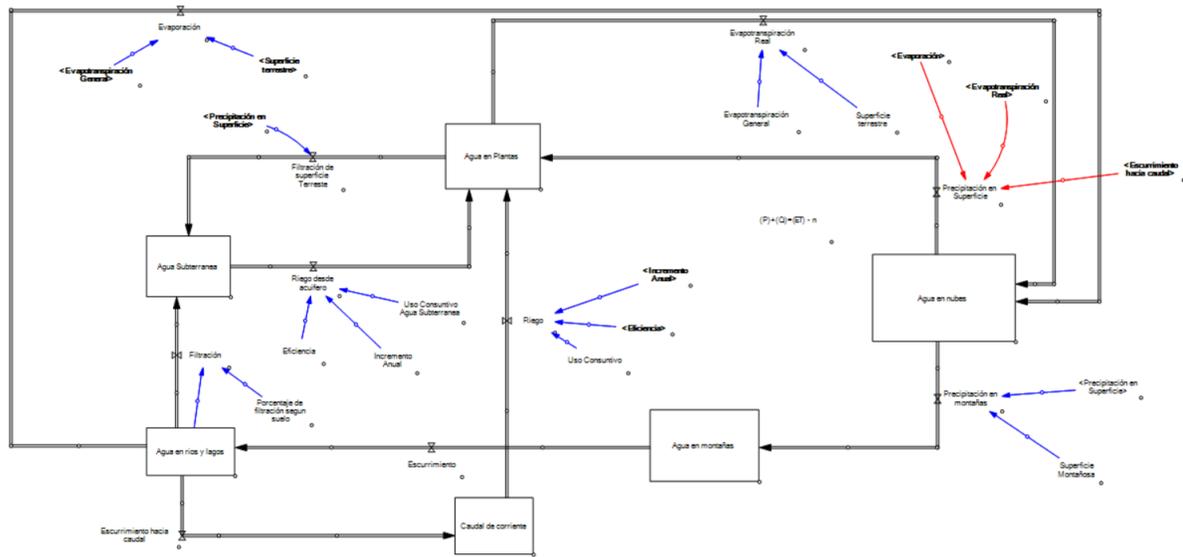


Figura 24. Primer modelo simulado interacción humana – ciclo del agua, *Elaboración propia*.

Para la ejemplificación de la primera simulación se tomaron en cuenta las gráficas de comportamiento de las 6 variables de nivel correspondientes al ciclo del agua, siendo estas:

a) Agua en nubes:

El agua en nubes corresponder a la concentración de agua en estado gaseoso, la cual en el modelo está definida en la unidad de m³ (metros cúbicos), y su valor se obtiene al calcular [2]:

$$An + EV + ET - Pm - Ps \quad [2]$$

Donde: An = Agua en nubes EV = Evaporación ET = Evapotranspiración

Pm = Precipitación en montañas Ps = Precipitación en superficie.

En la Figura 25 se puede observar el comportamiento de la variable. Si bien debido al comportamiento del ciclo del agua esta no debería acumularse a través del tiempo, está si lo estaba haciendo, ya que al estar planteada en la ecuación como una suma, esta actuaba como un acumulador, por lo cual se tuvo que corregir para la efectividad del modelo en la segunda simulación.

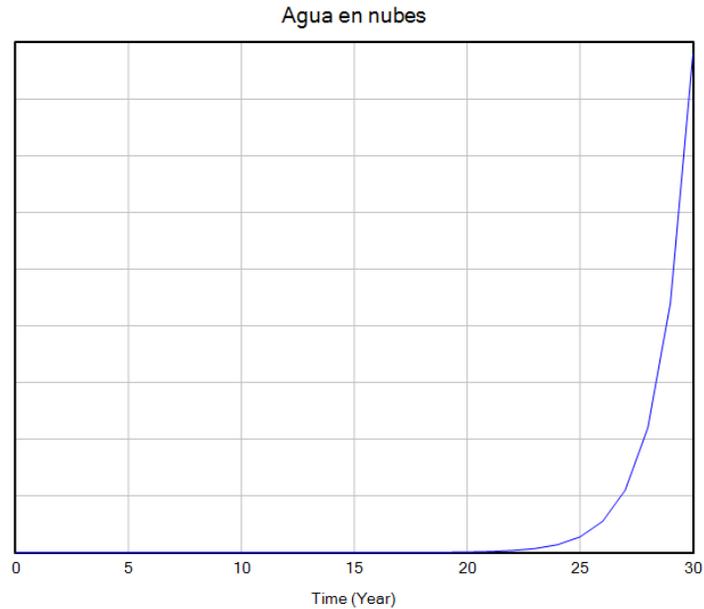


Figura 25. Gráfico Agua en nubes – Simulación1, *Elaboración propia*

b) Agua en montañas:

El Agua en montañas en el modelo corresponde a la acumulación de agua o nieve producto de las precipitaciones, si bien en un sistema real la acumulación de nieve también se debe al proceso de Desublimación, para efectos del modelo y debido a que no existen datos sobre los valores que puede representar esta variable, esta no fue considerada en el modelo final.

La ecuación planteada para el cálculo de esta es [3]:

$$Am + Pm - Q \quad [3]$$

Donde: $Am = \text{Agua en montañas}$ $Pm = \text{Precipitación en montañas}$ $Q = \text{Esguerrimiento}$

En la Figura 26 se puede ver observar que el comportamiento va a la baja lo cual, teniendo en cuenta que en el modelo se busca obtener un equilibrio (un comportamiento paralelo al eje x)

en la mayor parte de las variables (exceptuando por el agua subterránea), esto significaba que había errores o valores que aún no estaban corregidos.

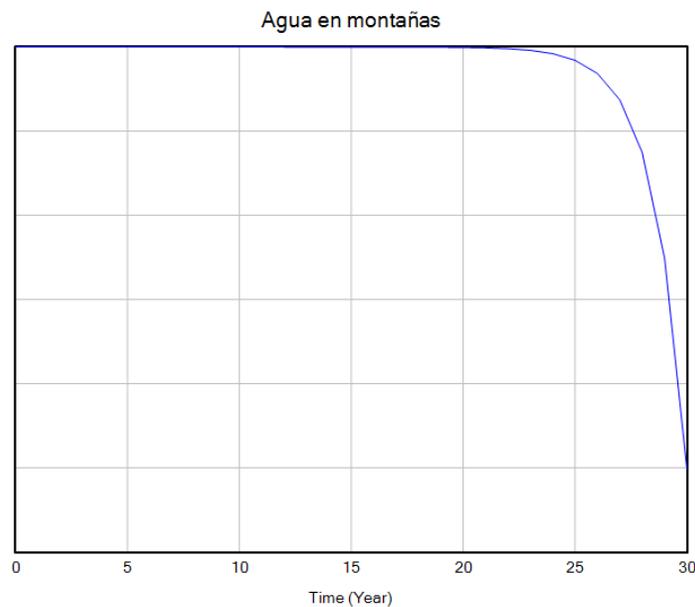


Figura 26. Gráfico Agua en montañas – Simulación1, *Elaboración propia*

c) Agua en plantas:

El agua en plantas corresponde a la cantidad de agua que es absorbida por plantas y árboles de un determinado sector. Para efectos de este modelo, además contempla el agua contenida en la superficie terrestre.

La ecuación planteada para el cálculo de esta es [4]:

$$Ap + R + Ps - ET - F \quad [4]$$

Ap = Agua en plantas R = Riego Ps = Precipitación Superficial

ET = Evapotranspiración F = Filtración

En este caso el riego corresponde a la suma del riego proveniente desde agua subterráneas y el provenientes de un caudal. En la figura 27 se puede observar una tendencia al aumento dado que los 2 factores que afectan directamente a la disminución de agua en esta variable de nivel son procesos lentos.

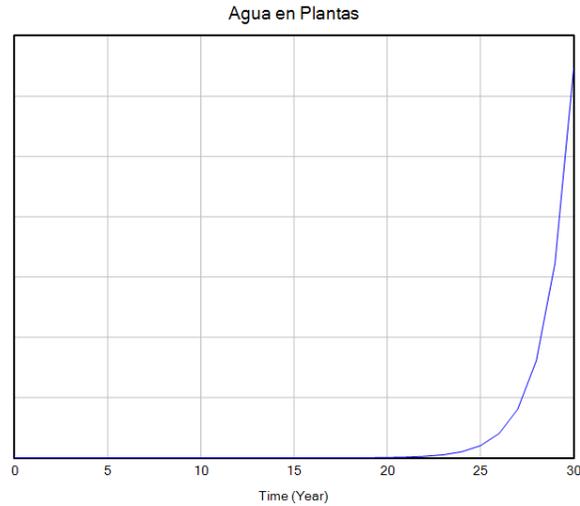


Figura 27. Gráfico Agua en plantas – Simulación1, *Elaboración propia*

d) Agua en ríos y lagos:

Esta variable de nivel presente en el modelo corresponde al caudal principal, este caudal proviene desde las montañas y las salidas de esta variable son la evaporación y el caudal de corriente [5], donde este último se refiere a una subcuenca.

$$Q - Ev - F - Qc \quad [5]$$

F = Filtración Q = Esgurrimiento EV = Evaporación Qc = Esgurrimiento Hacia Caudal

En base al gráfico de la Figura 28 correspondiente a aguas en montañas, se observa que estas presentan un comportamiento constante. Considerando que se espera en que un caudal en un escenario real mantenga un caudal promedio, un gráfico con un valor constante representa correctamente el escenario esperado.

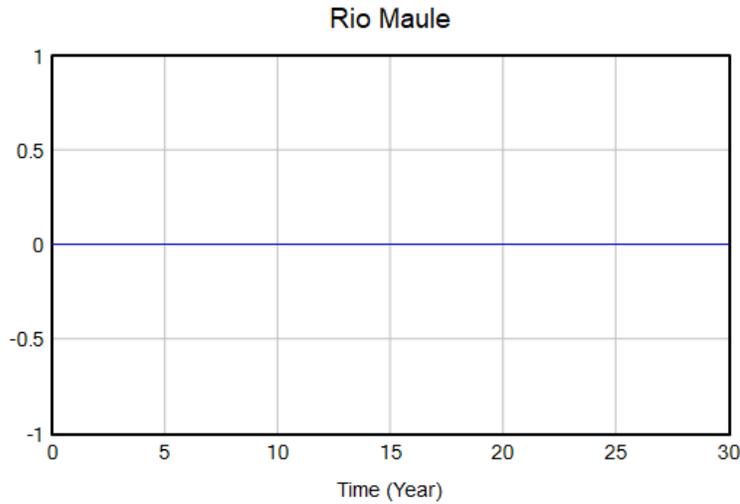


Figura 28. Gráfico Agua en ríos y lagos – Simulación1, *Elaboración propia*

e) Agua Subterránea:

En el modelo desarrollado, esta variable de nivel corresponde a la acumulación de aguas en acuíferos subterráneos. Este acumulador posee como entrada la filtración proveniente de ríos y la superficie terrestre [6]. Respecto a la superficie terrestre en esta variable, los datos asociados corresponden a agua acumulada por riego u/o precipitaciones.

$$As + F + R + P \quad [6]$$

Donde:

$$As = \text{Agua Subterranea} \quad F = \text{Filtración} \quad R = \text{Riego} \quad P = \text{Precipitación}$$

El comportamiento de la gráfica en la Figura 29 se debe a que las variables de salida correspondientes al riego son muy bajas en la región abarcada por el río claro y la comuna de San Clemente. Aquí, según la DGA (2017), el afloramiento correspondiente es de 5.3 en el sector, que al ser positivo significa que entra más agua de la que sale.

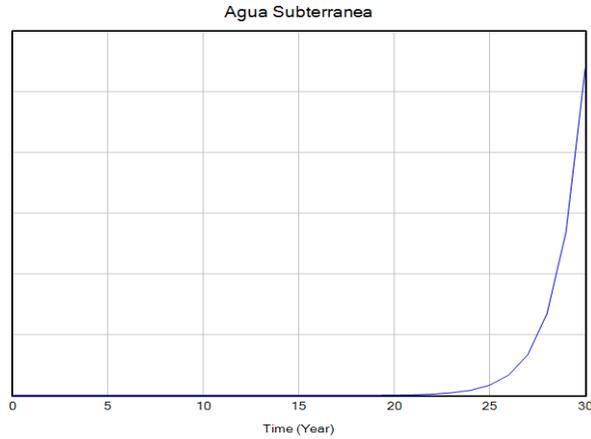


Figura 29. Gráfico Agua subterránea– Simulación1, *Elaboración propia*

f) Caudal de corriente:

Corresponde al agua que desboca desde una cuenca principal, como el río Maule, a una subcuenca como es en este caso el río Claro. Se puede observar en la Figura 30 que este se mantiene estable debido a que, siendo un caudal, si bien tiene un volumen de agua al igual que el agua en ríos, este está en constante desplazamiento y a menos que afecte un factor externo como una represa o grandes cargas fluviales no debería variar en gran medida.

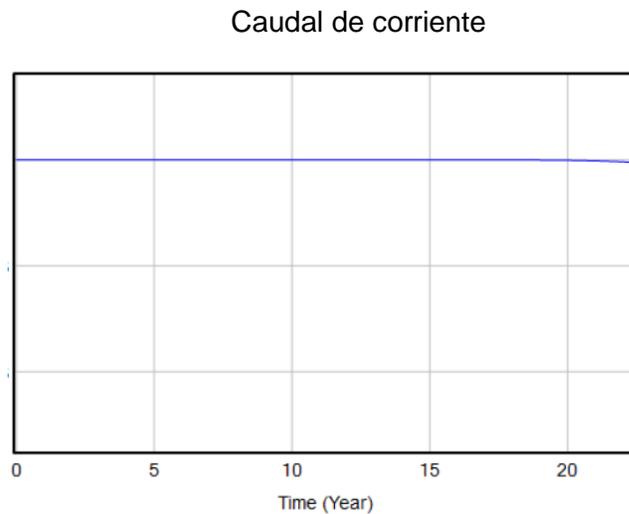


Figura 30. Gráfico Caudal de corriente– Simulación1, *Elaboración propia*

4.3.2 Segunda Simulación

Tras la realización de la primera simulación, se lograron encontrar diversos problemas en cuanto a las unidades en las que estaba trabajando el modelo, así como la falta de salidas que ayudaran a establecer un equilibrio en los valores de diversas variables como el río Maule (antes llamada Agua en ríos y lagos), así como el río Claro (antes llamada Caudal de corriente), todos estos cambios se pueden observar directamente en la Figura 31.

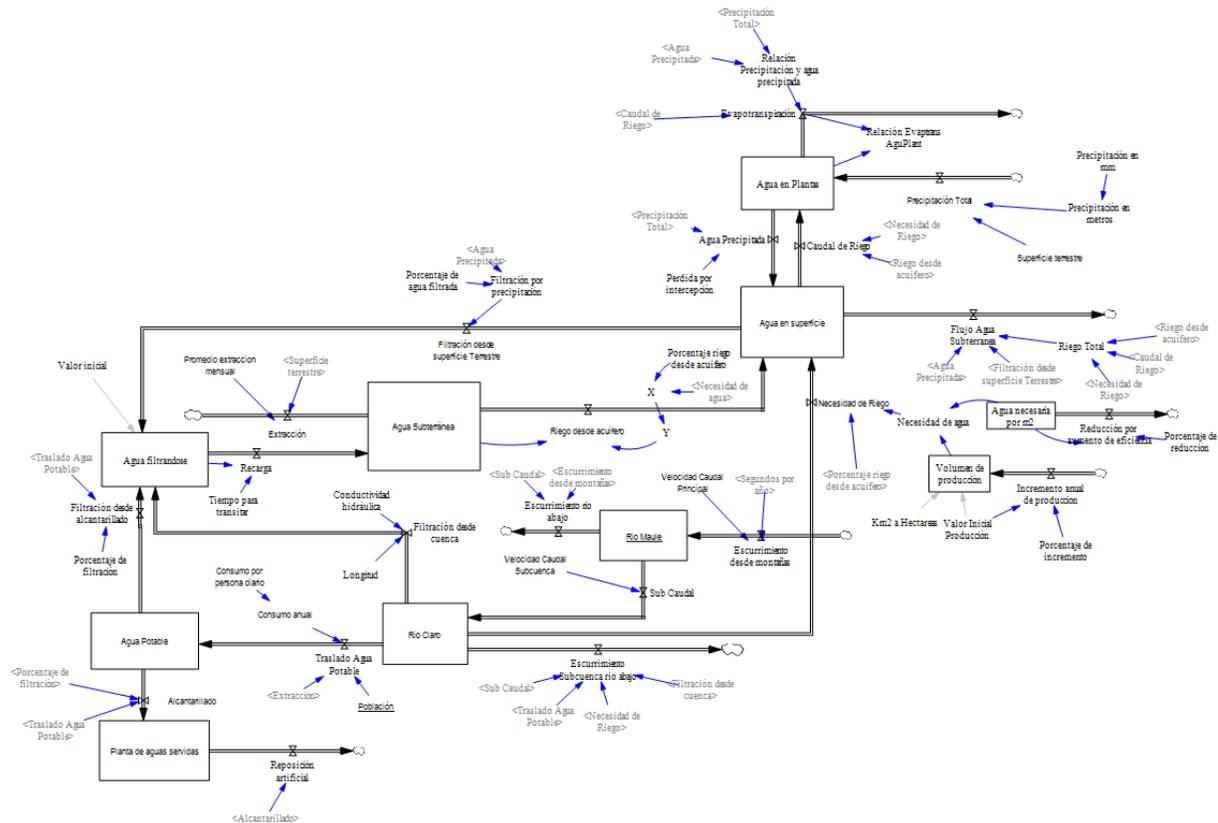


Figura 31. Modelo Interacción humano – ciclo del agua para 2da simulación, elaboración propia

Los cambios experimentados por el modelo antes de realizar la simulación estuvieron dirigidos a:

a) Las unidades de las variables:

Existían muchas variables que no estaban siendo medidas en la misma unidad, se corrigió esto designando las variables de stock en m^3 y los flujos en $m^3/year$, de forma que todo el modelo está siendo evaluado en estas unidades.

b) Eliminación y adición de variables de stock que facilitaran el proceso:

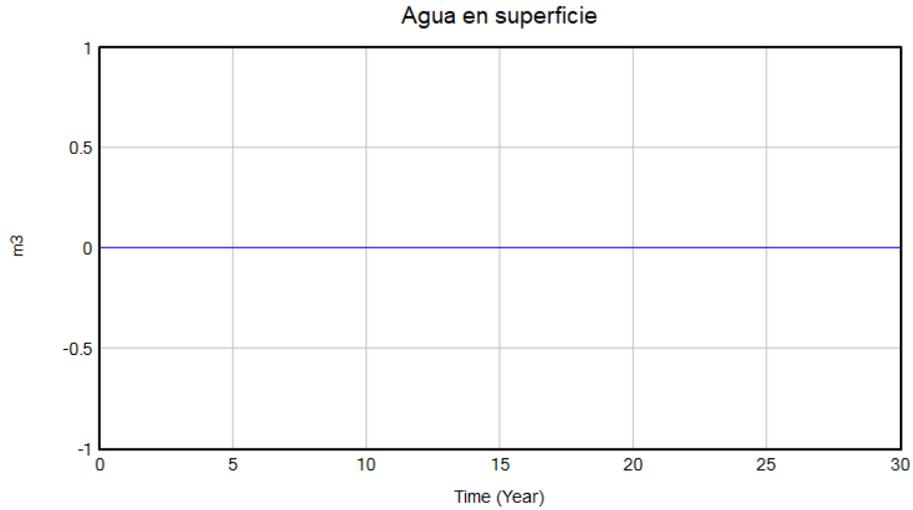
Tras la primera simulación, se decidió eliminar las variables de stock correspondientes a:

- Agua en montañas (Eliminada): esta variable fue eliminada dado que los datos recopilados para el modelo están en base a San Clemente y la cuenca del río Claro, y la intersección entre estos no comprende montañas.
- Agua en nubes (Eliminada): esta variable fue eliminada dado que actuaba como un acumulador, lo cual no representa un escenario real en cuanto al ciclo del agua.
- Agua en superficie (Añadida): se añadió esta variable con la finalidad de separar el concepto de agua en plantas y agua en superficie, facilitando la comprensión del modelo.
- Agua filtrándose (Añadida): esta variable actúa como un retraso en la reposición de agua a través de filtración.

c) Validación Segunda Simulación:

Un factor indispensable para comprobar la efectividad del modelo es el validarlo través del comportamiento de las variables. Al respecto, se puede esperar que en un escenario real variables como las que corresponden al agua en el río Claro, el agua en la superficie o agua potable no posean un valor negativo (Figuras 32 y 33), o mantenga la tendencia en cuanto a su valor inicial como en este caso fue designado en 0 con tal comprobar la posibilidad de que pueda tener una tendencia negativa. El comportamiento de estas variables se debe a que al ser variables de stock que están en constante uso o tienen un flujo constante, no deberían tener tendencia a acumularse (Curvas positivas) o a tener curvas negativas, a menos que se le añadiera otra variable que generara este cambio.

Un ejemplo de esto corresponde al agua potable, ya que si bien esta se almacena en un lugar y dependiendo del volumen utilizado puede variar, siempre va a tener una tendencia a mantenerse en base a la demanda que se presenta.

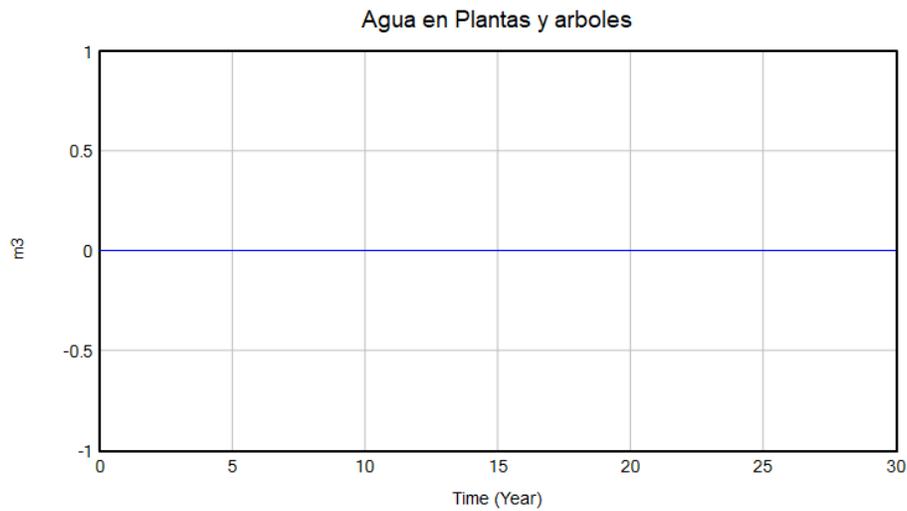


$$AP - Qr - FiSupT - FaSub + Nr + RAcu$$

Donde: *AP = Agua Precepitada* *Qr = Caudal de Riego* *FaSub = Flujo Agua Subterranea*

FiSupT = Filtración desde superficie terrestre *Nr = Necesidad de riego*

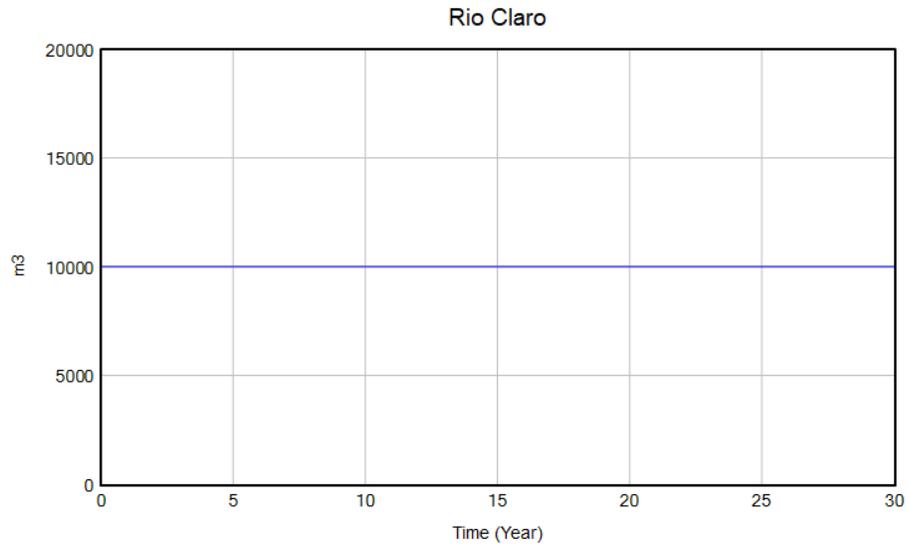
RAcu = Riego desde acuífero



$$Qr + P - ET - AP$$

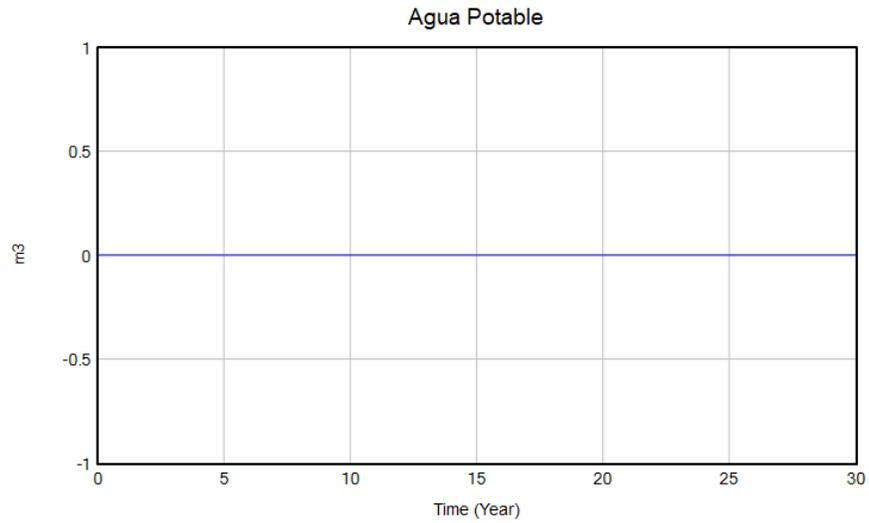
Donde: *Qr = Caudal de Riego* *P = Precipitación Total* *ET = Evapotranspiración*

AP = Agua Precipitada



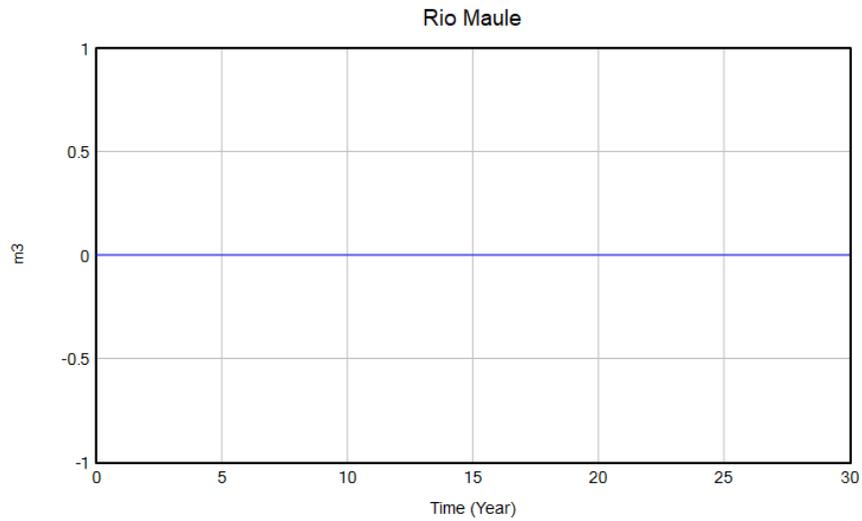
$$SubQ - (EtoSubC + FiCca + Nr + TAP)$$

Donde: *SubQ* = Sub Caudal *EtoSubC* = Esgurrimento Subcuenca rio abajo
FiCca = Filtración desde cuenca *Nr* = Necesidad de riego *TAP* = Traslado Agua Potable



$$TAP - (Ado + FiAdo)$$

Donde: *TAP* = Traslado Agua Potable *Ado* = Alcantarillado
FiAdo = Filtración desde alcantarillado

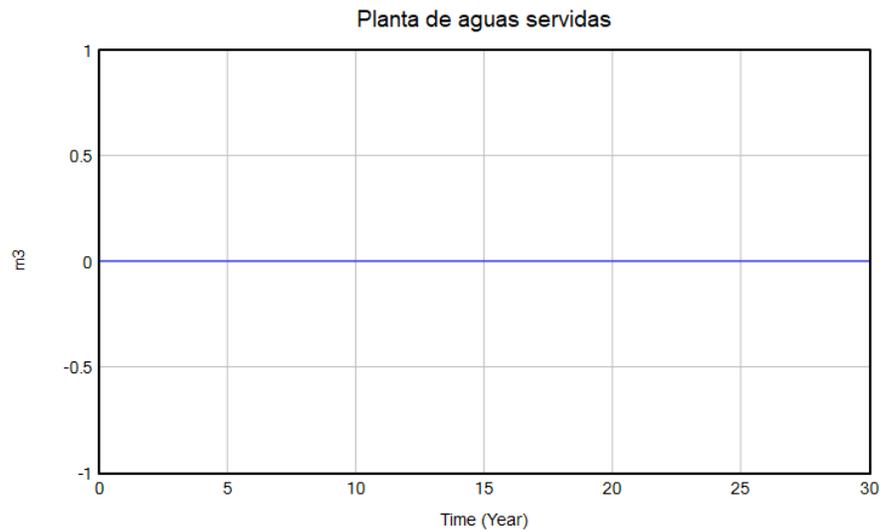


$$SubQ - (EtoSubC + FiCca + Nr + TPA)$$

Donde: *SubQ* = Sub Caudal *EtoSubC* = Esgurrimento Subcuenca rio abajo

FiCca = Filtración desde cuenca *Nr* = Necesidad de riego

TAP = Traslado Agua Potable

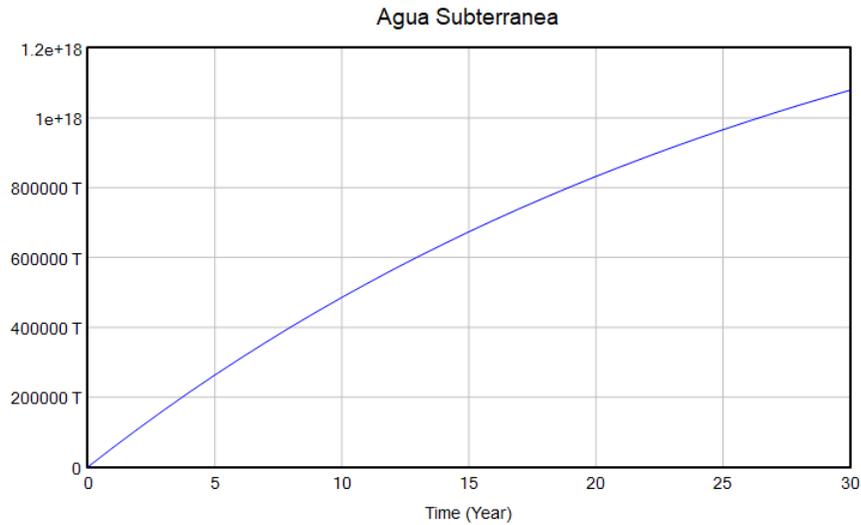


$$Ado - RArt$$

Donde: *Ado* = Alcantarillado *RArt* = Reposición Artificial

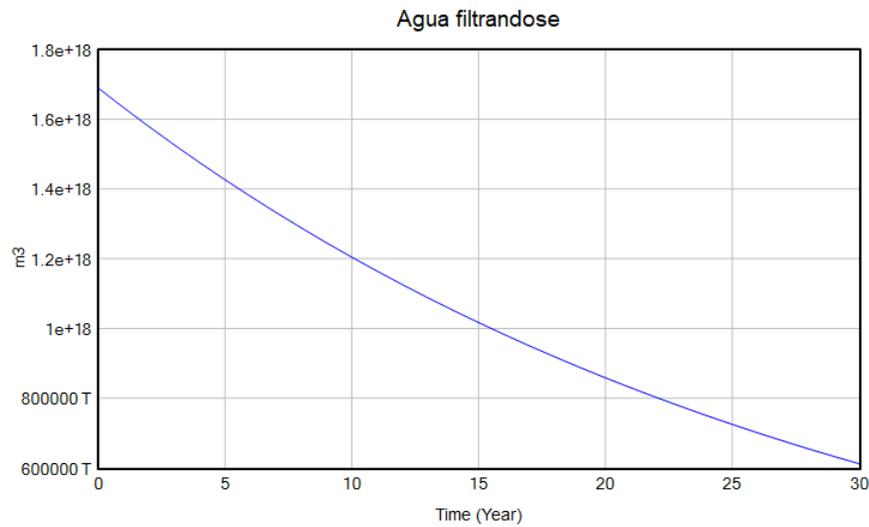
Figura 32. Gráficos de comportamiento de variables de stock estables simulación 2. *Elaboración propia*

Por otra parte, variables de stock como el agua subterránea y agua filtrándose (Figura 33) si deben mantener un crecimiento o decrecimiento en base a la demanda, dado que esta no se recarga en base a una necesidad externa o tiene un flujo de entrada y salida equitativo que genere estabilidad en esta.



$$Rga - Exn - RAcu$$

Donde: $Rga = \text{Recarga}$ $Exn = \text{Extracción}$ $RAcu = \text{Riego desde acuífero}$



$$FiCca + FiAdo + FiSupT - Rga$$

$FiCca = \text{Filtración desde cuenca}$ $FiAdo = \text{Filtración desde alcantarillado}$

$FiSupT = \text{Filtración desde superficie terrestre}$ $Rga = \text{Recarga}$

Figura 33. Gráficos de comportamiento de variables de stock exponenciales simulación 2. Elaboración propia

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado, las variables de stock correspondientes a “Agua filtrándose” y “Agua subterránea”, son las únicas que pueden presentar una variación en su comportamiento.

4.3.3 Tercera Simulación

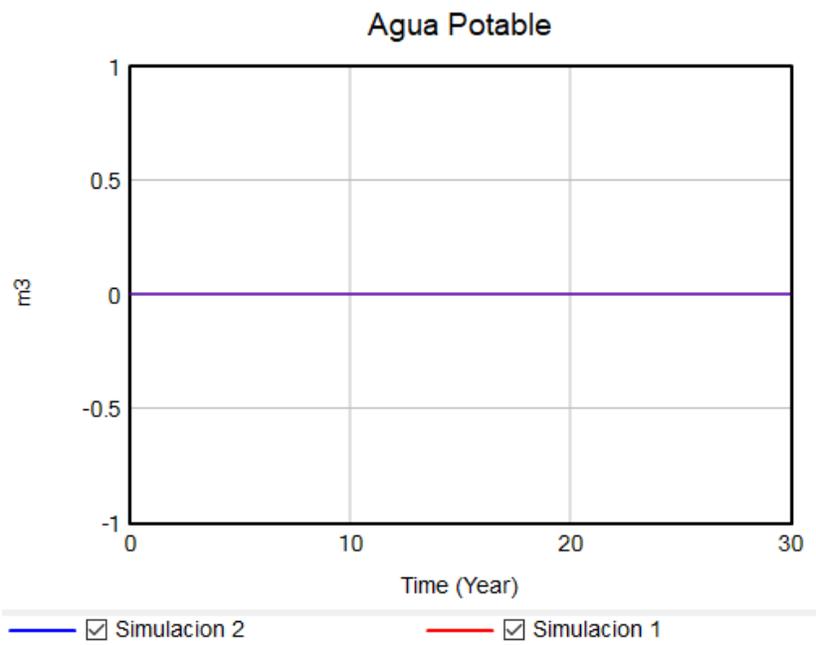
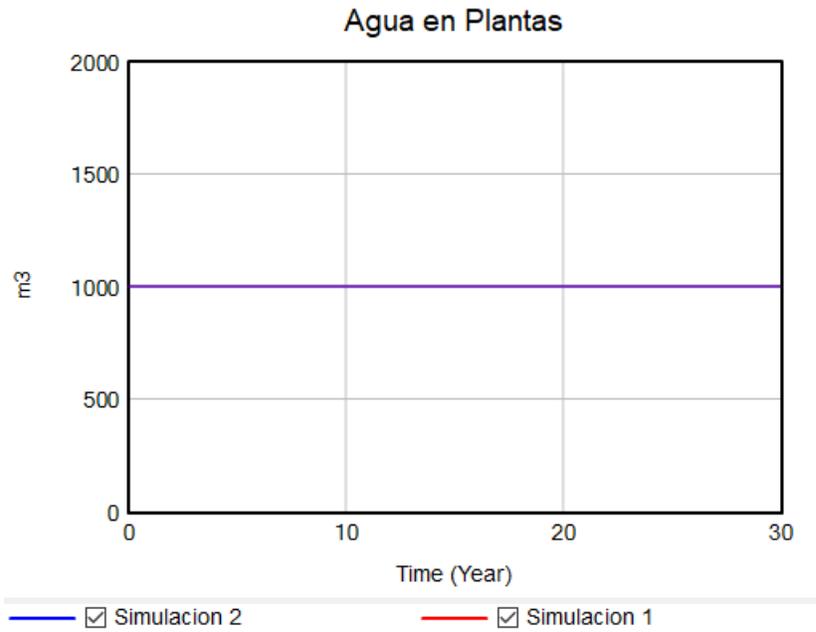
Comprendiendo el punto anterior como el primer paso para validar el modelo, fue necesario exponer el modelo a cambios que permitan ver si este mantiene su comportamiento en las variables de stock y si también los cambios se ven reflejado en las variables de flujo.

Dada la gran cantidad de variables presentes en el modelo, no se utilizaron cada una de ellas para ver las variaciones, si no que se seleccionaron al azar las que fueron utilizadas para comprobar el comportamiento del modelo y que correspondieron a:

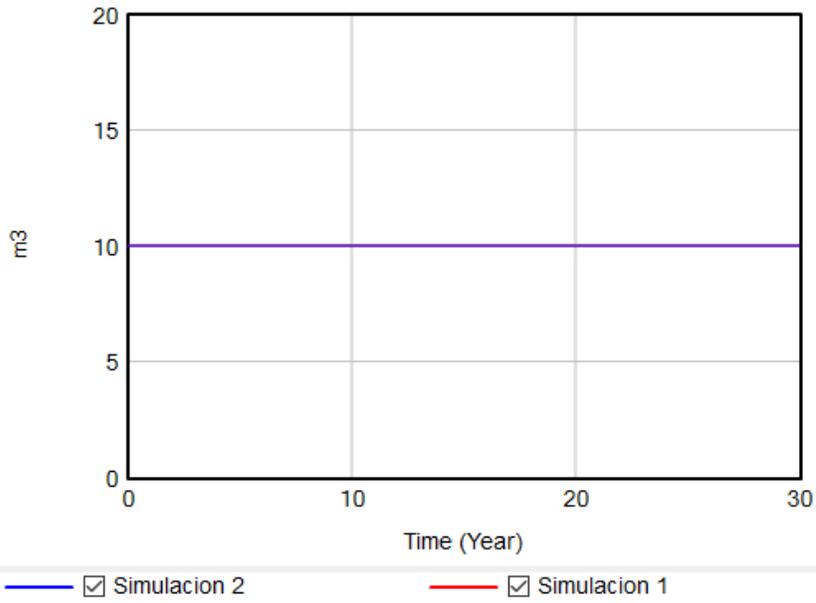
- Consumo por persona diaria: 0,18 -> 0,12
- Porcentaje de agua filtrada: 0,15 -> 0,03
- Porcentaje de riego desde acuífero: 0,18 -> 0
- Tiempo para transitar: 30 -> 20

Considerando que las ecuaciones y la división de variables son las mismas descritas anteriormente, a continuación, solo se presentan los resultados de la nueva simulación (Figuras 34 y 35).

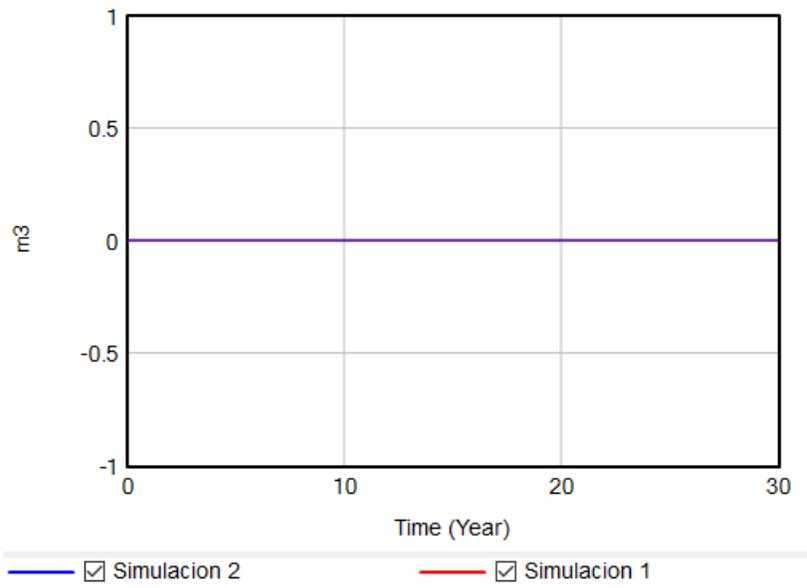
- Variables estables:



Agua en superficie



Planta de aguas servidas



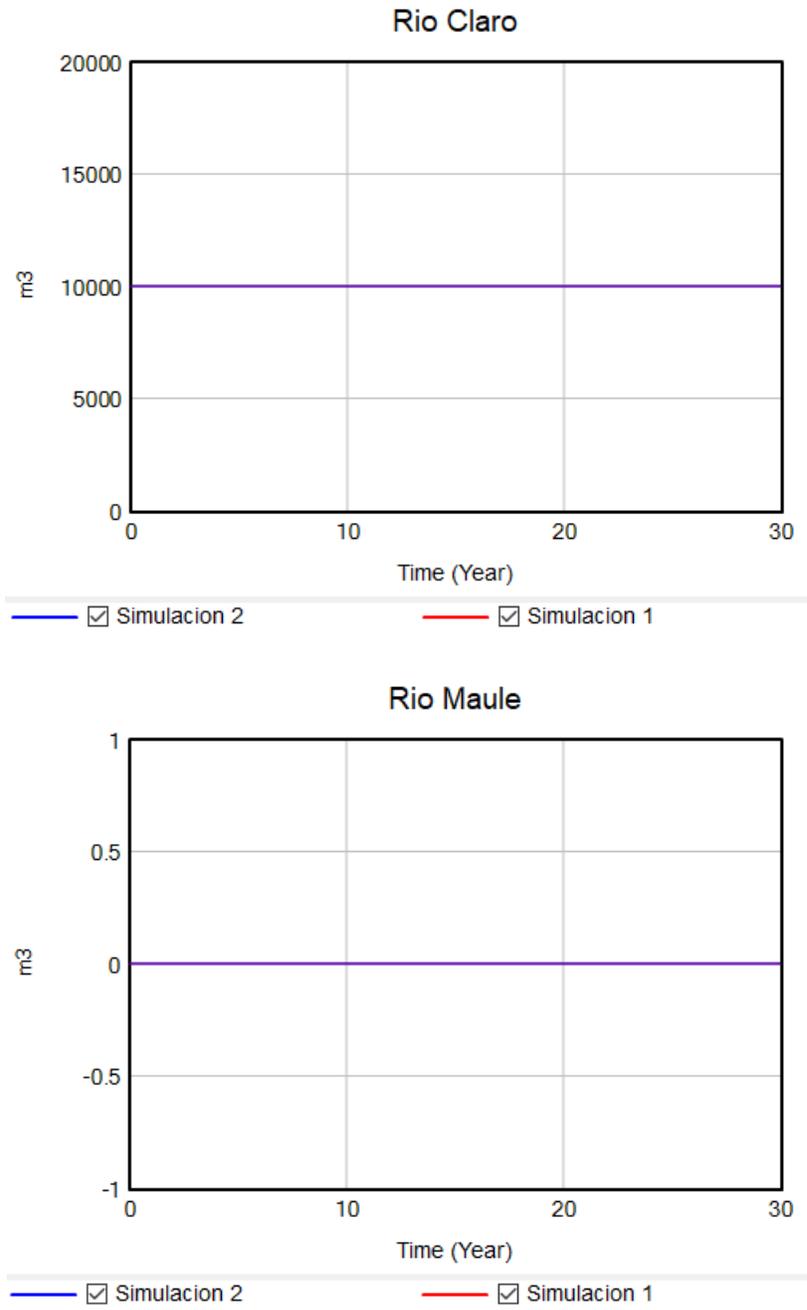


Figura 34. Gráficos de comportamiento de variables de stock estables simulación 3. *Elaboración propia*

- Variables con comportamiento exponencial:

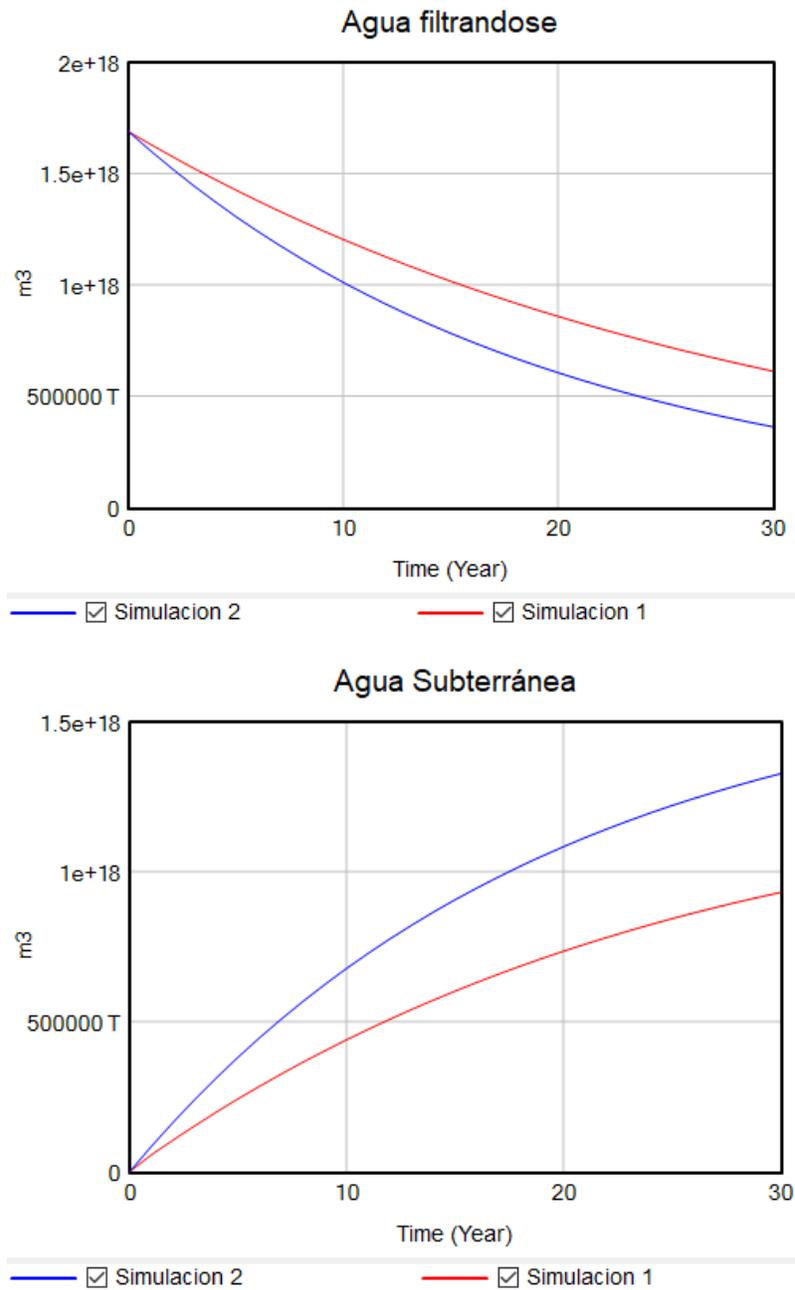


Figura 35. Gráficos de comportamiento de variables de stock exponenciales simulación 3. *Elaboración propia*

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS

En este capítulo se presenta el análisis del modelo desarrollado en torno a la variable “Agua subterránea”, a fin de conocer los escenarios probables respecto a la subcuenca seleccionada.

Considerando que la escasez de agua es catalogada como un desequilibrio entre el suministro y la demanda de agua dulce en un área determinada, esta escasez de agua se puede deber directamente a una demanda demasiado elevada para la cantidad de agua disponible, lo que muchas veces termina en una sobre explotación de agua subterránea. O también, en algunos casos, la escasez hídrica puede deberse a la infraestructura resultante del desarrollo exagerado de infraestructuras hidráulicas para el nivel de suministro disponible (FAO, 2013).

Con la finalidad de “descubrir” la posibilidad de una futura crisis hídrica y conociendo la importancia del agua subterránea como variable en el ciclo del agua y el impacto que esta tiene al momento de establecer la existencia de una escasez de agua, se decidió realizar un análisis en base de esta variable, considerando 4 gráficos de variables (Necesidad de agua, Riego desde acuífero, Extracción, Recarga) que complementan su comportamiento y 2 sliders (Promedio extracción mensual, Incremento anual de producción) de variables que hacen que fluctúe el comportamiento de todos los gráficos.

5.1 Análisis estado inicial agua subterránea

El primer análisis mostrado en la Figura 36 corresponde al comportamiento del agua subterránea sin cambios, en base a las variables de extracción, recarga, riego desde acuífero, necesidad de agua, tomando en cuenta la variación provocada por el humano en el promedio de extracción mensual (Bebida, Uso Doméstico, Saneamiento) y el incremento anual en de producción (Uso de agua en la producción de alimentos). Aquí se debe considerar que el valor inicial de agua subterránea está definido en 0 como el punto inicial, ya que no existen datos sobre la cantidad de agua existentes en la zona estudiada. De esta forma, la curva representada en la variable correspondiente a agua subterránea demostraría que, según los datos tabulados en el modelo, el agua subterránea tendería a crecer hasta llegar a un punto donde comienza a aplanarse. El comportamiento de esta variable a crecer en un inicio se debe directamente a la cantidad de recarga, por lo que tiene comportamientos inversos. Cabe señalar que las gráficas correspondientes a extracción, necesidad de agua y riego desde acuífero se mantienen constantes a través del tiempo dado que las variables que lo componen

están en un flujo constante. Si bien la variable riego desde acuífero al comienzo de sus ciclos tiene un crecimiento, en realidad se debe al crecimiento durante el inicio desde el ciclo 0 al año 1, lo cual no representa ninguna diferencia significativa con el resto de las variables ya mencionadas.

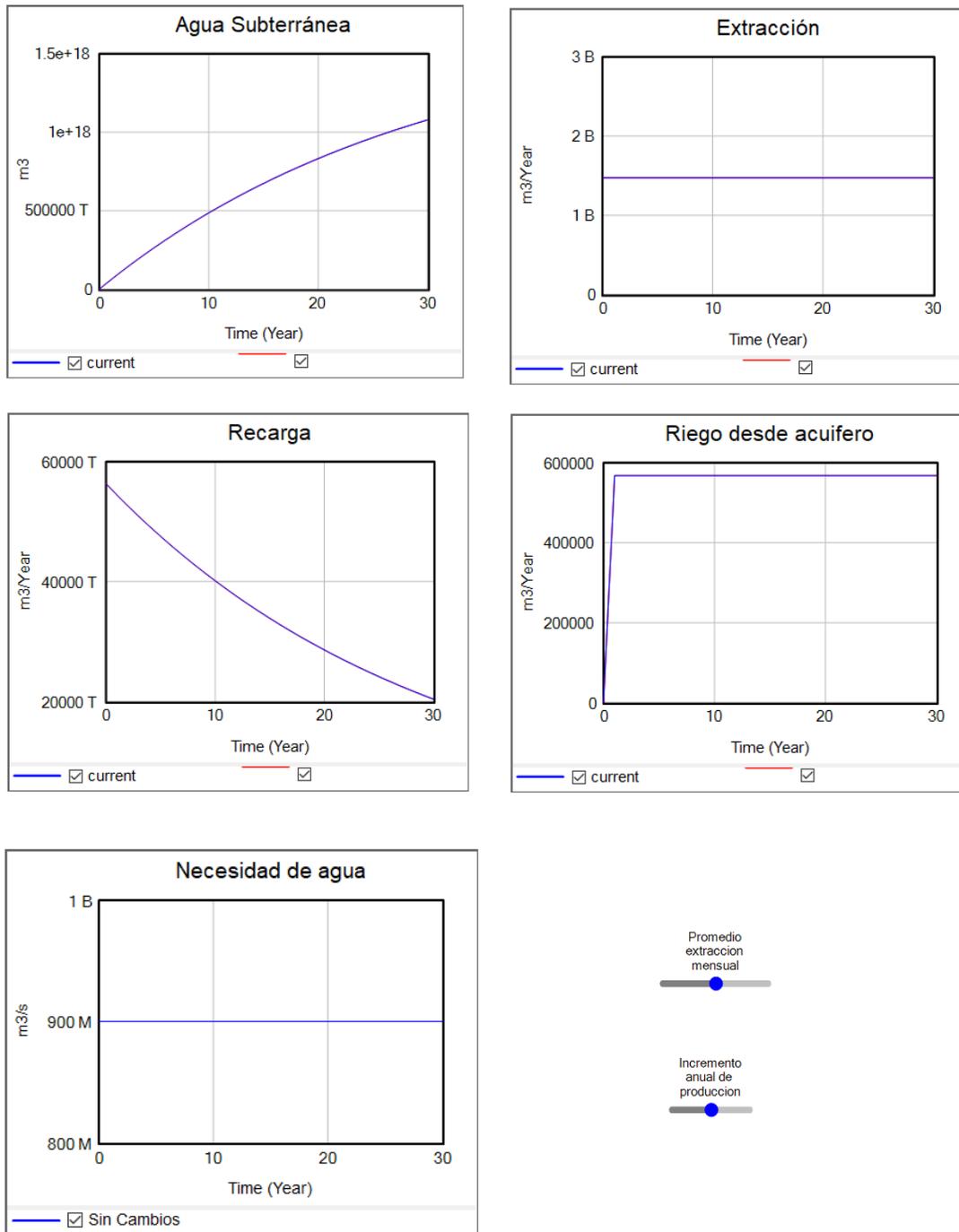


Figura 36. Gráficas de comportamiento del agua subterránea sin cambios, Elaboración Propia.

5.2 Análisis con cambio en la extracción

En la Figura 37 se presenta el comportamiento del agua subterránea con cambios en “Promedio extracción mensual”, en base a las variables de extracción, recarga, riego desde acuífero, necesidad de agua, tomando en cuenta la variación provocada por el humano en el promedio de extracción mensual (Bebida, Uso Doméstico, Saneamiento) y el incremento anual en de producción (Uso de agua en la producción de alimentos). En la Figura 38 se presenta el comportamiento del agua subterránea con aumento excesivo en “Promedio extracción mensual”, en base a las variables de extracción, recarga, riego desde acuífero, necesidad de agua, tomando en cuenta la variación provocada por el humano en el promedio de extracción mensual (Bebida, Uso Doméstico, Saneamiento) y el incremento anual en de producción (Uso de agua en la producción de alimentos). Como se puede observar, se mantienen las relaciones con las variables ya mencionadas en el punto anterior donde se presentaba una situación estable donde no existían cambios en la demanda de agua subterránea de ningún tipo (consumo - producción). Para este punto se evaluó un escenario donde el promedio de extracción mensual aumentaba obteniendo como resultado (Anexo XV) una disminución en los niveles de agua subterránea, que no es visible en los gráficos debido a que el uso de agua subterránea para consumo es mínimo en comparación con los niveles existentes. No obstante, esto igual podría variar dependiendo de la posibilidad de un aumento en la necesidad de esta agua, o del sector de estudio al cual se le esté aplicando el modelo, pero considerando los datos estimados en la Tabla 6, la variabilidad del agua subterránea respecto al uso para consumo es mínimo. Esto igualmente se puede ver reflejado en las gráficas donde fue necesario establecer un valor mucho más grande a promedio extracción mensual para poder visualizar un comportamiento con tendencia a 0 en la cantidad de agua subterránea y en el flujo de recarga de agua.

Considerando lo anteriormente mencionado es rescatable que, así como los cambios en el agua subterránea son mínimos al solo aumentar el consumo, los cambios en el resto de las variables tampoco presentan un gran impacto en su comportamiento.

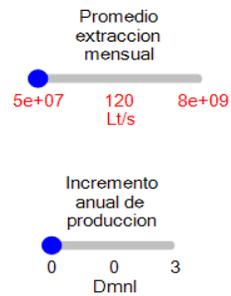
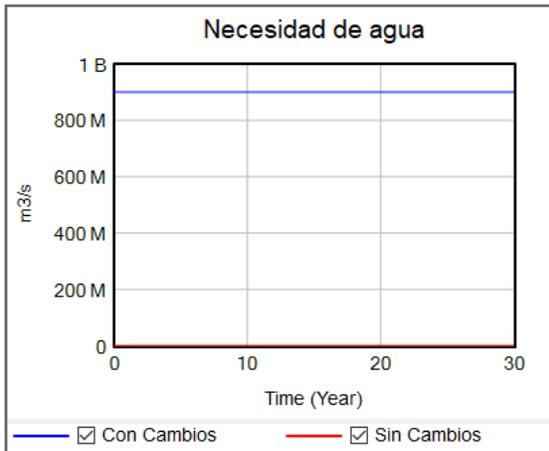
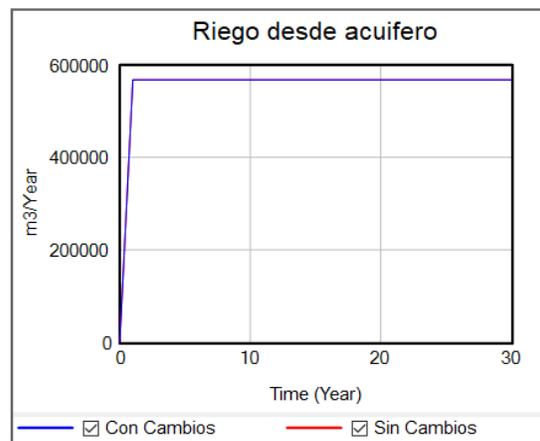
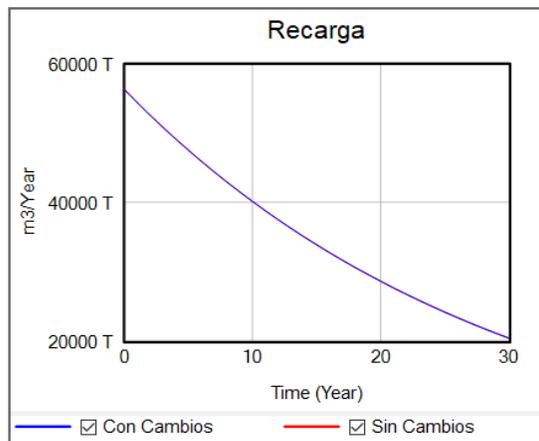
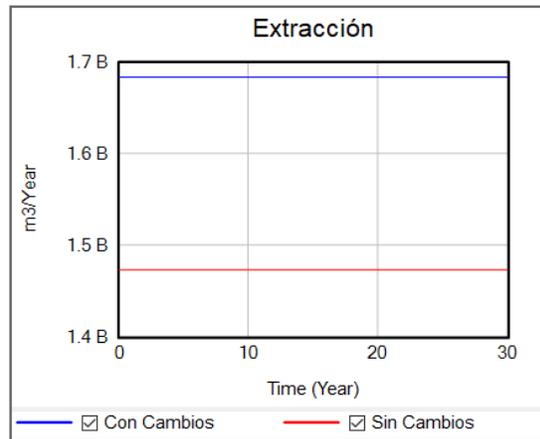
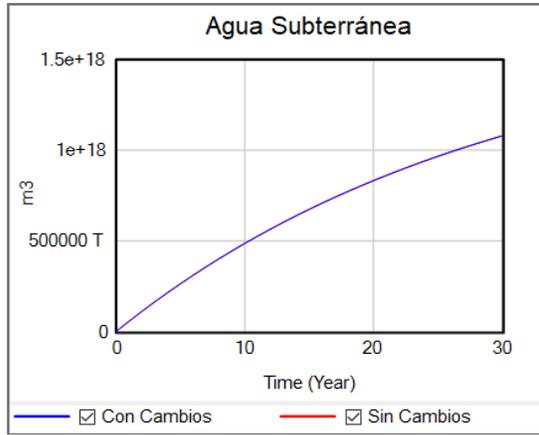


Figura 37. Gráficas del comportamiento del agua subterránea con cambios, *Elaboración Propia.*

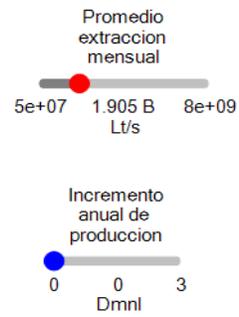
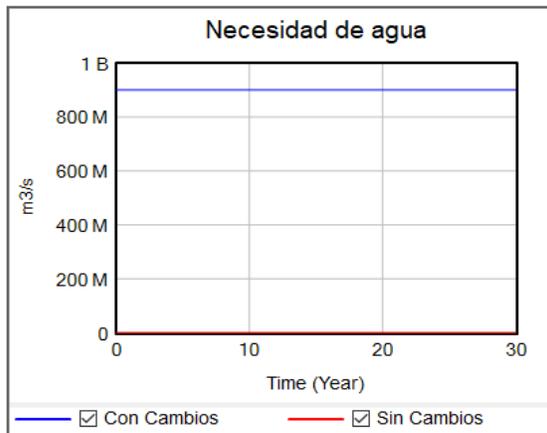
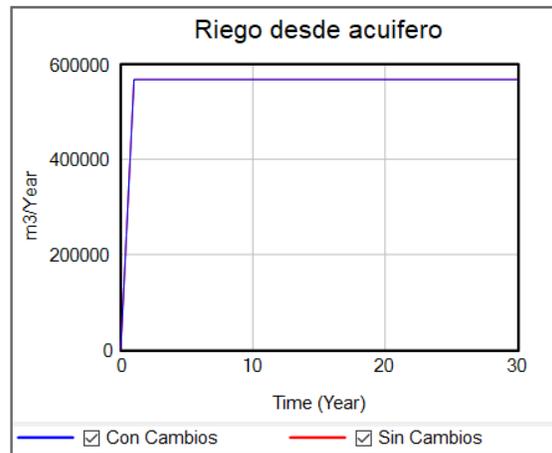
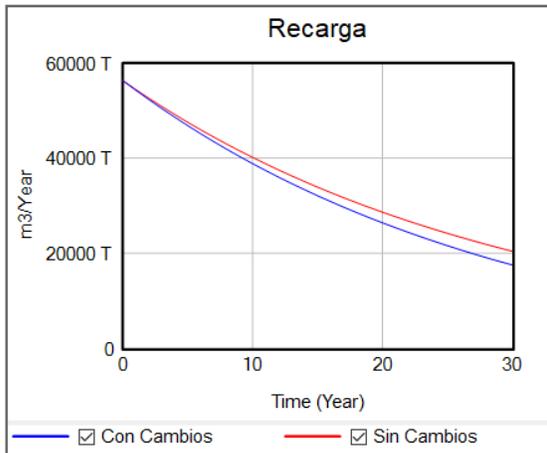
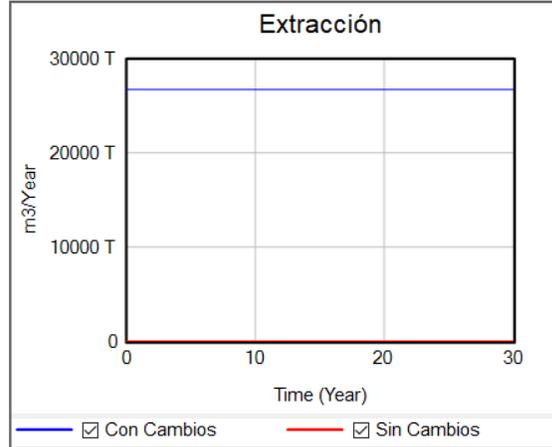
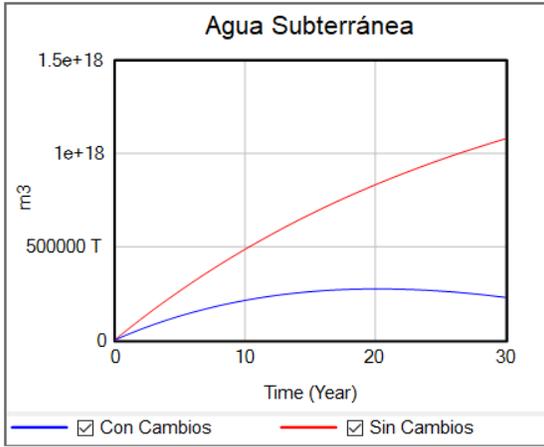


Figura 38. Gráficas de comportamiento del agua subterránea con aumento excesivo, Elaboración Propia.

5.3 Análisis con cambios en promedio extracción mensual e incremento en la producción

Considerando los valores observados en el Anexo XVI, es reconocible que el uso de agua subterránea para la producción es mucho mayor al utilizado para el consumo humano. En este sentido, se esperaba que el comportamiento del stock de agua subterránea sea sensible ante esta variable, lo cual es comprobable al ver la Figura 39, donde se presentan las gráficas del comportamiento del agua subterránea con aumento en “incremento anual de producción”, en base a las variables de extracción, recarga, riego desde acuífero, necesidad de agua, tomando en cuenta la variación provocada por el humano en el promedio de extracción mensual (Bebida, Uso Doméstico, Saneamiento) y el incremento anual en de producción (Uso de agua en la producción de alimentos). En estas gráficas se aumenta a poco más del doble (x1,4) la producción para realizar el análisis del comportamiento, por consecuencia se puede observar en la gráfica correspondiente a agua subterránea una tendencia a disminuir gradualmente cada año, en función del respectivo aumento en la demanda. Este mismo comportamiento también se ve reflejado en las variables respectivas a necesidad de agua y riego desde acuífero, las cuales tienen una relación directa con el incremento de la producción, y por esto mismo mantienen el mismo crecimiento.

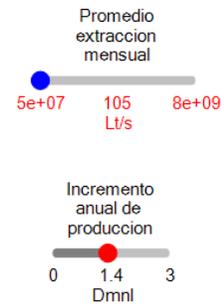
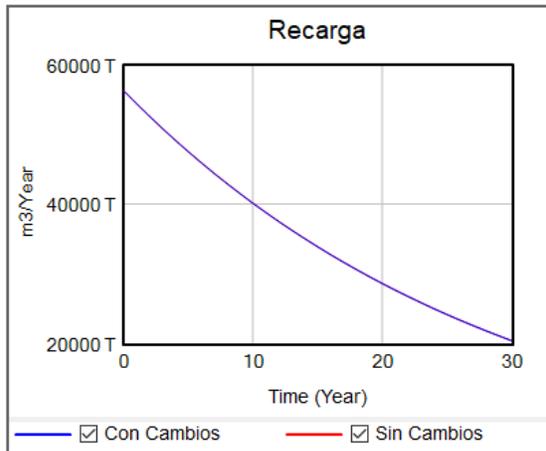
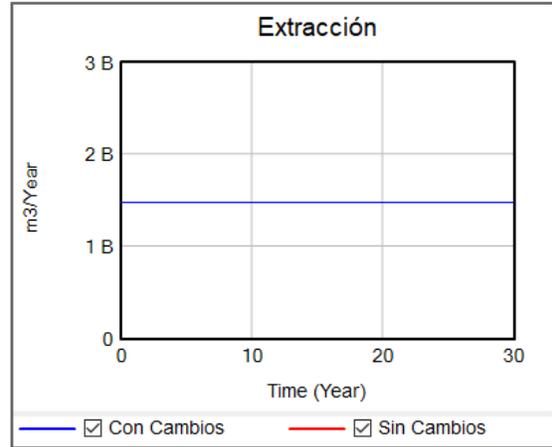
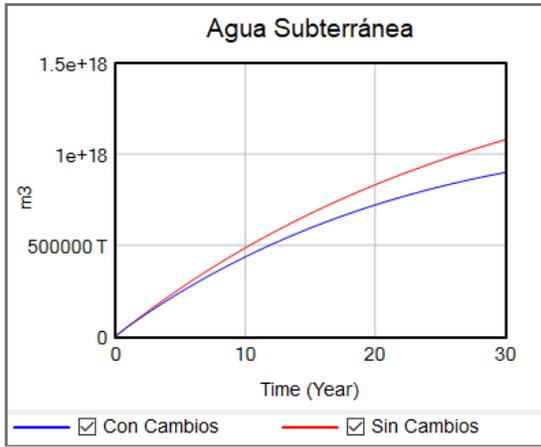


Figura 39. Gráficas del comportamiento del agua subterránea con aumento, Elaboración Propia.

5.4 Análisis general

Considerando los resultados obtenidos a través del modelo y los gráficos vistos durante este capítulo, se observa que el agua subterránea en los años finales del periodo analizado en el modelo (30 años), tiende a obtener una curva hacia el agotamiento del recurso, que si bien no es un proceso rápido denota que, a pesar de que sigue obteniendo agua a través de la recarga del recurso, esta no es lo suficientemente rápida como para compensar el consumo por parte del humano.

Por otra parte, si bien en las gráficas analizadas no se ve planteado el comportamiento del agua subterránea ante un aumento en la eficiencia del uso de esta, se puede aseverar que su comportamiento sería contrario al producido por el aumento en el volumen de producción.

Analizando lo planteado por la DGA (2020) respecto al posible escenario de una crisis hídrica debido a la falta de precipitaciones y al uso desmedido de este recurso, lo expuesto en las pruebas realizadas al modelo y conociendo las bases de la ecuación de balance hídrico donde se establece que los niveles de agua en el ecosistema no tienden a variar en gran medida, se interpreta que la implicancia del humano en la cadena de consumo ha sido el factor principal en el comportamiento de las diferentes variables, y que a pesar del esfuerzo que se hace al generar un reposición artificial a través de plantas de tratamientos, esto no es suficiente para disminuir la brecha entre consumo y reposición de los recursos hídrico, siendo demostrado en el modelo que uno de los métodos necesarios para evitar una posible crisis hídrica es mejorar los patrones de consumo.

Cabe destacar que a través de las distintas simulaciones se ha logrado comprobar la factibilidad de utilizar la dinámica de sistema en nuevos ambientes, pero al mismo tiempo se reconoce que para lograr una buena ejecución en el área destino se requiere tener el conocimiento que faciliten el desarrollo del modelo.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Se logra confirmar que la dinámica de sistemas, que posee su origen en la dinámica industrial, puede ser aplicada en diversos campos de estudio, logrando conceptualizar y modelar problemáticas fuera de su área para la cual fue creada en sus inicios, como en este caso para analizar el comportamiento del agua en una zona determinada. Esta metodología facilitó el entendimiento de la problemática, ya que, aún sin poseer bases sólidas respecto a hidrología, por medio de la dinámica de sistemas se pudo generar un aprendizaje y lograr un desarrollo óptimo en esta memoria.

La investigación realizada permite nuevos acercamientos al análisis de la crisis hídrica, debido a que en la actualidad la información respecto a esta problemática es de difícil comprensión para el público en general. Si bien la población logra ser consciente de la existencia de esta, el modelo desarrollado permite el acercamiento para un público general sin necesidad de conocimientos especializados o académicos, ya que logra conceptualizar las diversas dimensiones que influyen en esta problemática y así facilitar el entendimiento de los factores influyentes en la crisis hídrica.

Respecto a los análisis realizados, en cuanto a la crisis hídrica tomando en cuenta la variable de aguas subterráneas, existe una tendencia al agotamiento de este recurso en el tiempo de manera paulatina. Este comportamiento se va acrecentado en los últimos años del periodo simulado, por lo cual se espera que se mantenga la disminución del recurso hídrico a través del tiempo y a su vez una disminución en la recarga de agua subterránea. En cuanto al modelo desarrollado, se determina que permite simular un comportamiento de las distintas variables contenidas por el ciclo del agua.

El modelo se logró desarrollar gracias a la convergencia de la metodología de dinámica de sistemas y la ecuación del balance hídrico, donde la ecuación ayuda a generar una mejor estructuración del modelo de dinámica de sistema, otorgando a este un equilibrio respecto a los valores de entradas y salidas, y de esta forma, permitir generar validez en su comportamiento. Asimismo, la ecuación del balance hídrico logra facilitar la integración de las fórmulas y los valores que permitieron sensibilizar el comportamiento de las variables que integran el modelo.

Gracias al modelo se logró integrar el ciclo del agua con el uso de recursos hídricos por parte del ser humano, permitiendo estudiar el comportamiento de los componentes del ciclo del agua sin la necesidad de realizar un estudio in situ gracias al uso del modelo computacional, siendo así la metodología de dinámica de sistemas un gran apoyo en los procesos de investigación.

Cabe mencionar que el modelo desarrollado puede ser trabajado a mayor profundidad buscando un mayor acercamiento a la complejidad total del sistema real, pero esto requiere además de un foco en la interdisciplina por parte de los investigadores a cargo, mayor acceso a la información asociada y mecanismos para la obtención de esta tales como mediciones de estaciones meteorológica u otros mecanismos de muestreo en terreno. Esta mejora en el modelo y el trabajo considerando las bases planteadas en esta memoria, pueden generar un modelo con una mayor sensibilidad respecto a los escenarios reales posibles a futuro, obteniendo una mayor certeza respecto a los resultados mediante la simulación.

Sobre las limitantes durante el proceso de desarrollo de esta memoria, se menciona la escasa información respecto de la región analizada. Esto dificultó establecer ciertos valores en los procesos de simulación, por lo que se requirieron métodos alternos para la definición de los valores tabulados en el modelo. Esto a su vez, hizo compleja la selección de las variables que integraron finalmente la estructura del modelo. Particularmente, esta situación radicó en la escasa cantidad de estaciones meteorológicas en la región de estudio, siendo solo una la estación disponible con data asociada a la subcuenca analizada.

Además, respecto a la data utilizada, en el proceso de selección de información algunas de las fuentes de bases de datos presentaban vacíos en sus campos, lo que esto aumentaba la complejidad al seleccionar las fuentes de información para obtener resultados con información rigurosa. La complejidad del sistema real también fue una limitante, ya que esta era muy alta y al tener escasa información disponible aumentó la dificultad del desarrollo de esta memoria respecto a la búsqueda de la aproximación al sistema real con el modelo desarrollado.

Para finalizar, se concluye que es posible la mejora respecto a la complejidad del modelo a través del apoyo de especialistas en el área de la hidrología, se destaca la oportunidad que tienen los equipos interdisciplinarios para el logro de objetivos comunes como es en este caso el área de dinámica de sistemas con los conocimientos del estudio del agua y su comportamiento, esto abre las puertas a nuevos proyectos de investigación referentes al análisis y conceptualización de problemáticas que afectan a nuestra sociedad y que puede ser abordadas a través del uso tecnologías de información y sus metodologías asociadas.

BIBLIOGRAFÍA

Aracil, J., & Gordillo, F. (2005). Dinámica de sistemas (Alianza Universidad Textos 168). Madrid: Alianza.

Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya, & Mesfin M. Mekonnen. (2011). The waterfootprint assessment manual, pp.19-40. https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf.

Assaf, H., van Beek, E., Borden, C., Gijsbers, P., Jolma, A., Kaden, S., Kaltofen, M., Labadie, J. W., Loucks, D. P., Quinn, N. W. T., Sieber, J., Sulis, A., Werick, W. J., & Wood, D. M. (2008). Chapter Thirteen Generic Simulation Models for Facilitating Stakeholder Involvement in Water Resources Planning and Management: A Comparison, Evaluation, and Identification of Future Needs. En A. J. Jakeman, A. A. Voinov, A. E. Rizzoli, & S. H. Chen (Eds.). Developments in integrated environmental assessment, vol. 3, pp. 229-246. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-101X\(08\)00613-3](https://doi.org/10.1016/S1574-101X(08)00613-3).

Breneman, James & Harrell, Charles & Tumay, Kerim. (1997). Simulation made easy, a manager's guide.

Dirección General de Aguas. (2015). Atlas del Agua. Chile 2016.

Dirección General de Aguas. (2016b). Análisis efecto en el régimen hídrico por cambio en patrones meteorológicos. Desarrollado por Hídrica Consultores SPA.

Dirección General de Aguas. (2017). Actualización del balance hídrico nacional.

Dirección General de Aguas. (2017). Metodología para la Actualización del Balance Hídrico Nacional.

Dirección General de Aguas (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro, SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dirección General de Aguas. (2020). Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín no 503.

Donoso, G. (Ed.). (2018). Water policy in Chile, vol. 21. Springer international publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76702-4>.

FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Roma.

FAO (2013). Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria, Roma. <https://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>

Fercovic, J., Foster, W., & Melo, O. (2019). Economic development and residential water consumption in Chile.

Forrester, J. (1961): Industrial dynamics, MIT Press.

González-Busto, B. (1998). La dinámica de sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación. Universidad de Oviedo.

Harrington, H. J.; Tumay, K. (2003.). Simulation modeling models. McGraw Hill New York. USA. High Performance Systems.

Hartmann, S. (1996). The World as a Process. Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, pp. 77-100. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8686-3_5.

Humphreys, P. (1990). Computer Simulations. PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, 1990, pp. 497–506. <http://www.jstor.org/stable/193093>.

Liu, W., Wang, L., Zhou, J., Li, Y., Sun, F., Fu, G., Li, X. and Sang, Y.F., (2016). A worldwide evaluation of basin-scale evapotranspiration estimates against the water balance method. Journal of Hydrology, 538, pp.82-95.

MOP (abril, 2017). Balance de gestión integral año 2016. https://dga.mop.gob.cl/acercadeladga/informesgestion/Documents/BGI_2016_DGA.pdf.

NOAA. (febrero, 2019). Water cycle, <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/freshwater/water-cycle>.

OCDE. (2017). Brechas y estándares de gobernanza de la infraestructura pública en Chile. <https://doi.org/10.1787/9789264286948-es>.

Pallottino, S., Sechi, G.M., Zuddas, P. (2005). A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. *Environmental Modelling & Software* 20, pp. 1031-1042.

Pizarro, R., Garcia-Chevesich, P. A., McCray, J. E., Sharp, J. O., Valdés-Pineda, R., Sangüesa, C., Jaque-Becerra, D., Álvarez, P., Norambuena, S., Ibáñez, A., Vallejos, C., & Mendoza, R. (2022). Climate Change and Overuse: Water Resource Challenges during Economic Growth in Coquimbo, Chile. *Sustainability*, vol. 14(6), pp. 3440. <https://doi.org/10.3390/su14063440>.

Ríos Insua, D. (2000). *Simulación: Métodos y aplicaciones*. Santafé De Bogotá: Alfaomega.

Rossi, G., Vega, T., Bonaccorso, B., 2007. *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Springer, pp. 418. <https://link-springer-com.utralca.idm.oclc.org/content/pdf/10.1007/978-1-4020-5924-7.pdf>.

SAB Miller y WWF. (2009). *Water footprinting - Identifying & addressing water risks in the value chain*, WWF. https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/sab0425_waterfootprinting_text_artwork.pdf.

Shiklomanov's, I. (1993). chapter "World freshwater resources" in Peter H. Gleick (editor), *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. (Numbers are rounded), dominio público. <https://www.usgs.gov/media/images/distribution-water-and-above-earth>.

Schaffernicht, M. (2006). *Indagación de situaciones dinámicas mediante la dinámica de sistemas*. Tomo 1: Fundamentos. http://www.docentes.fcefa.edu.bo/imorales/wp-content/uploads/sites/9/2013/09/DINAMICA_DE SISTEMAS.pdf

Schaffernicht, M. (2009). *Indagación de situaciones complejas mediante la dinámica de sistemas*. Tomo 1: Fundamentos. <https://editorial.utralca.cl/?wpdmpro=indagacion-de-situaciones-complejas-mediante-la-dinamica-de-sistemas>.

Schaffernicht, M. (2009). Redescubrimiento guiado de sistemas complejos mediante simuladores de dinámica de sistemas. *Proceedings del XXV Encuentro Nacional de Facultades de Administración y Economía, ENEFA*. Vol. 2, Paper n° 27.

Shanon, R. (1975). *Systems Simulation: The Art and Science*.

Sterman, John. (2000). *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World*. https://www.researchgate.net/publication/44827001_Business_Dynamics_System_Thinking_and_Modeling_for_a_Complex_World.

Sulis, A., & Sechi, G. M. (2013). Comparison of generic simulation models for water resource systems. *Environmental Modelling and Software*, vol. 40, pp 214-225. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.012>.

UNESCO. (1971). Scientific framework of world water balance. Paris. UNESCO (Technical papers in Hydrology, N°7).

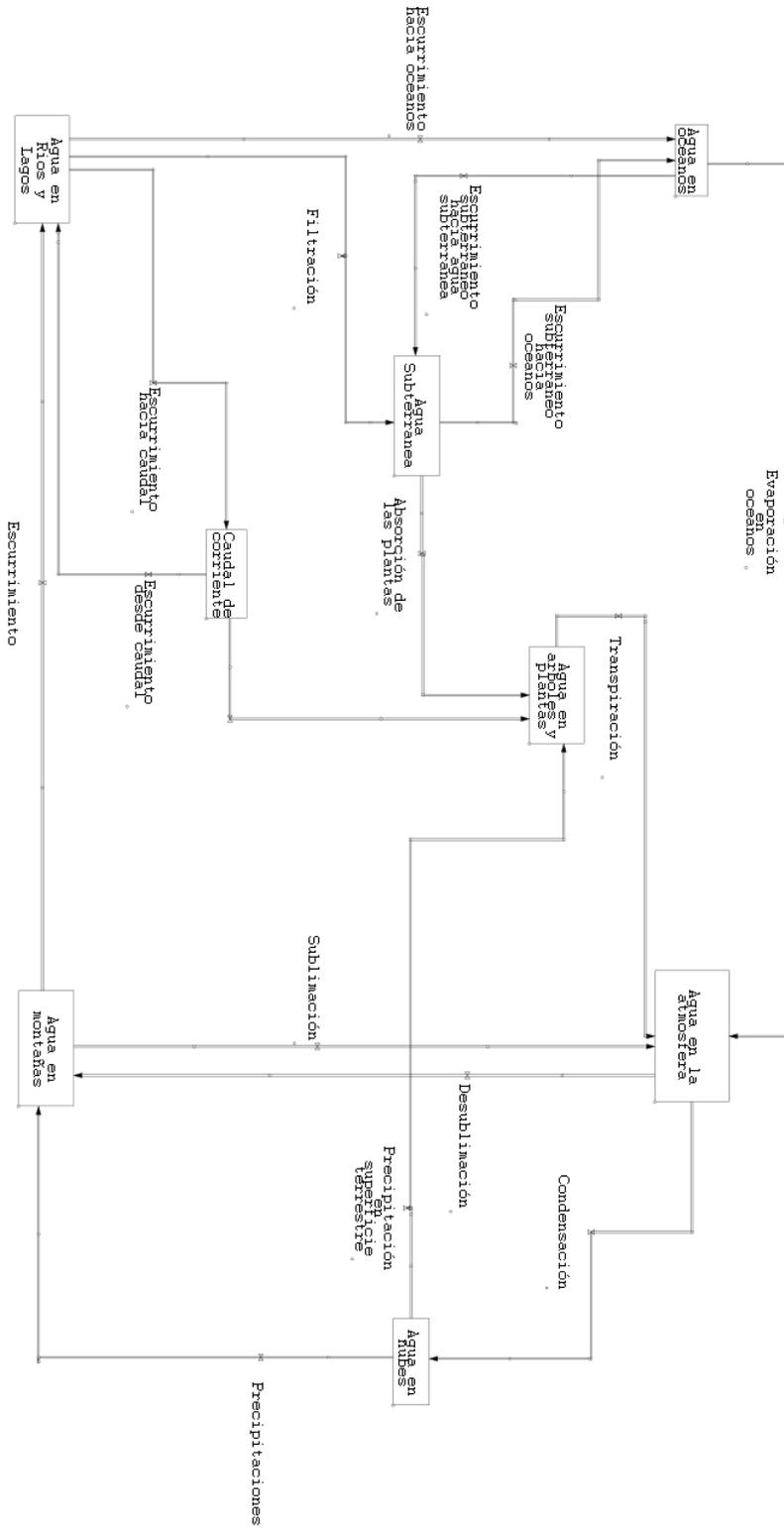
UNESCO. (1981). Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Uruguay. UNESCO Regional Office for Science and Technology for Latin America and the Caribbean.

UNESCO. (2021). Escasez hídrica en Chile: desafíos pendientes. https://chile.un.org/sites/default/files/2021-03/PB%20Recursos%20H%C3%ADricos_FINAL_17%20de%20marzo.pdf.

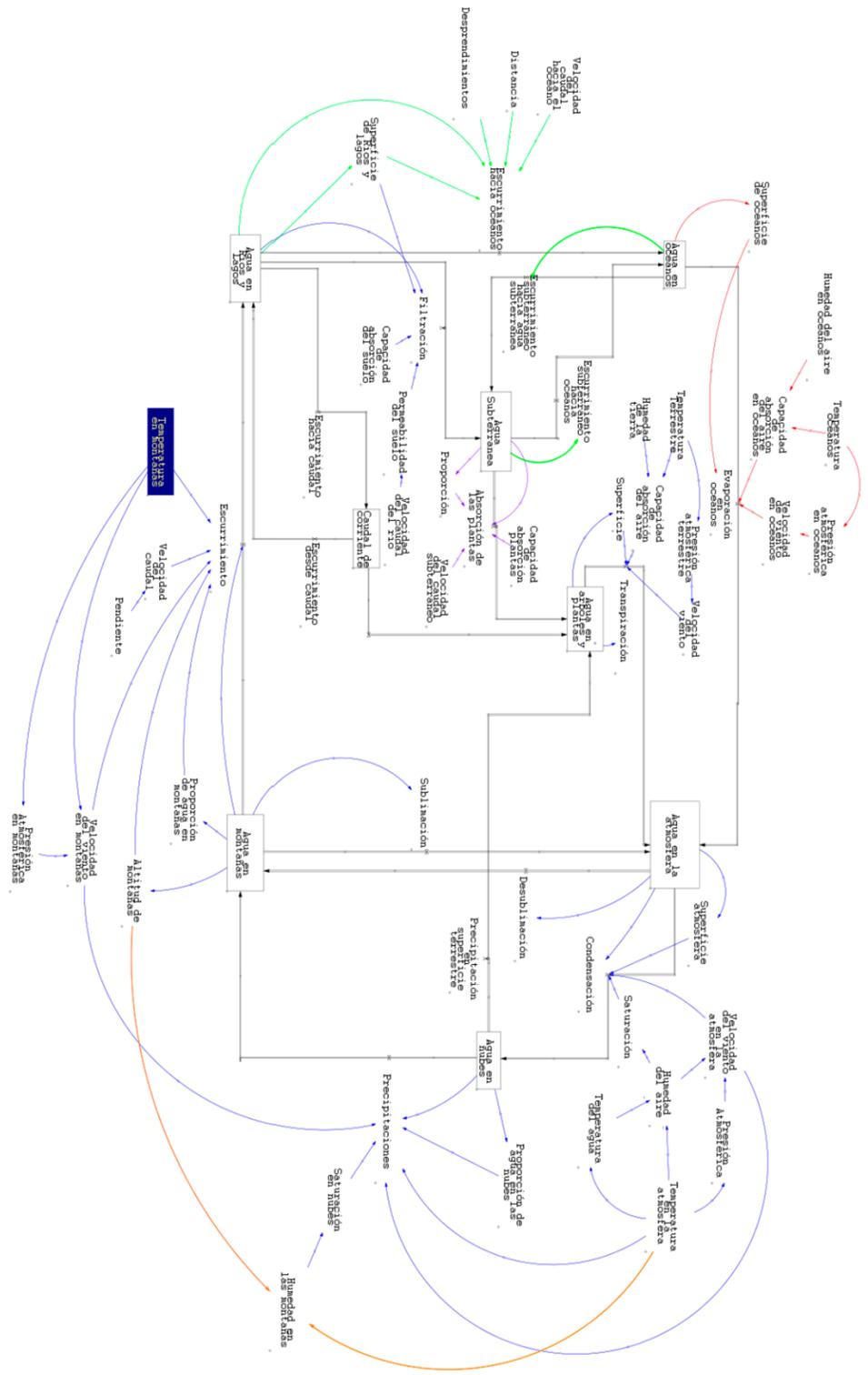
UNESCO / ONU-Agua. (2003). Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos: Agua para todos, agua para la vida, UNESCO, París.

USGS. (2019). The water cycle. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish>.

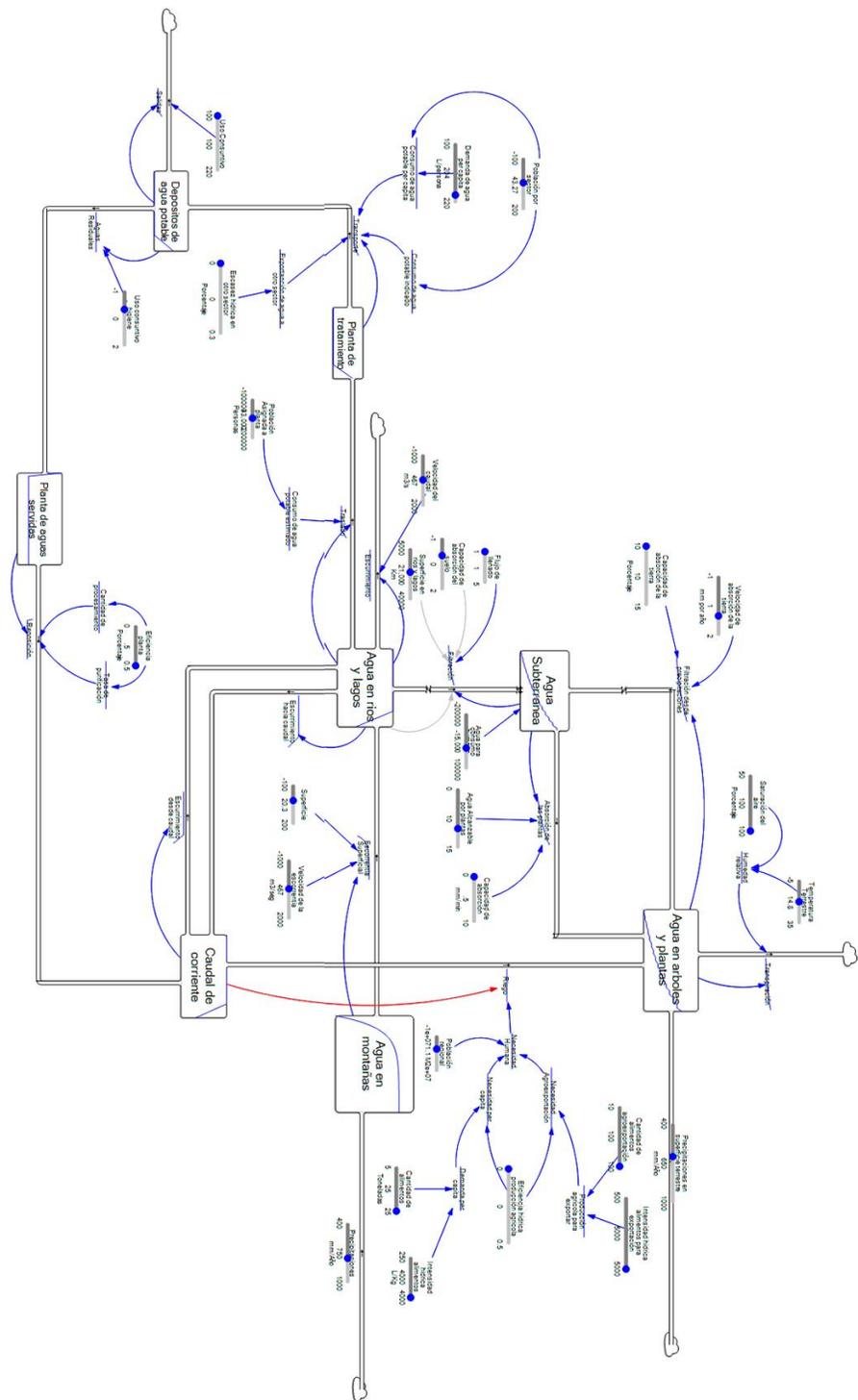
ANEXO I. Modelo Ciclo del Agua Sin Agentes



ANEXO II. Modelo del Ciclo del Agua Con Agentes



ANEXO III. Modelo del Ciclo del Agua Con Agentes e Interacción Humana



ANEXO IV. Documentación Variables de Modelo

El glosario siguiente corresponde a las siglas del “Tipo” de cada variable, que son detalladas en las siguientes tablas:

L	Level – Stock – Acumulador
F	Flow – Flujo
C	Constant – Constante
A	Auxiliary – Auxiliar
Dmnl	Dimensionless – Sin Dimensiones
M3	Metro Cúbico
M3/year	Metro Cúbico por año
dt	Valor Inicial

Tabla 7 Documentación de variables del modelo.

Grupo	Tipo	<i>Variable Nombre y Descripción</i>
Modelo V16	#0 L	<p>Agua en Plantas (m3) $= \int ((\text{Caudal de Riego} + \text{Precipitación Total}) - \text{Evapotranspiración}) - \text{Agua Precipitada } dt + 1000.0$</p> <p>Descripción: Corresponde a el agua absorbida por las plantas el riego de las mismas, o la absorción de agua mediante la precipitación.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relación Evapotranspiración y Agua en Plantas.
Modelo V16	#1 L	<p>Agua en superficie (m3) $= \int (((\text{Agua Precipitada} - \text{Caudal de Riego}) - \text{Filtración desde superficie Terrestre}) - \text{Flujo Agua subterránea}) + \text{Necesidad de Riego}) + \text{Riego desde acuífero } dt + 10.0$</p> <p>Descripción: Corresponde a el agua que se acumula en la superficie terrestre.</p>
Modelo V16	#2 L	<p>Agua filtrándose (m3) $= \int (\text{Filtración desde alcantarillado} + \text{Filtración desde superficie Terrestre}) - \text{Recarga } dt + \text{Valor inicial}$</p>

		<p align="center">Descripción: Agua que está en proceso de ser filtrada.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Recarga = <i>Recarga de agua en los acuíferos subterráneos.</i>
Modelo V16	#3 L,F	<p>Agua necesaria en m3 (m3/Year)</p> <p>= \int - Reducción por aumento de eficiencia dt + 15000.0</p> <p>Description: Agua necesaria para producir alimentos, medida en m3</p> <p>Usado Por</p> <ul style="list-style-type: none"> Necesidad de agua <i>Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos en m3/s y calculada a través de la multiplicación del agua necesaria por m3 con el volumen de producción medido en hectáreas</i> Reducción por aumento de eficiencia
Modelo V16	#4 L	<p>Agua Potable (m3)</p> <p>= \int Traslado Agua Potable-(Alcantarillado+ Filtración desde alcantarillado) dt + 0.0</p> <p>Descripción: Corresponde al agua potable disponible para un sector determinado, y almacenado en torres de agua.</p>
Modelo V16	#5 F,A	<p>Agua Precipitada (m3/Year)</p> <p>= Precipitación Total*(1- Perdida por intercepción)</p> <p>Descripción: Cantidad de agua precipitada que llega a la superficie y no ha sido interceptada por las plantas.</p> <p align="center"><i>https://www.conaf.cl/protocolo-plantaciones/Documentos-y-estudios/Proteccion-de-suelos-y-agua/Relaciones_PpEV.pdf</i></p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Agua en Plantas = <i>Corresponde a el agua absorbida por las plantas el riego de las mismas, o la absorción de agua mediante la precipitación.</i> Agua en superficie = <i>Corresponde a el agua que se acumula en la superficie terrestre.</i> Filtración por precipitación = <i>Porcentaje de agua que se espera se filtre tras la precipitación.</i>

		<ul style="list-style-type: none"> Flujo Agua Subterránea = <i>Flujo de agua que tras la precipitación no ha sido filtrada en un acuífero, y se vuelve parte de un caudal subterráneo.</i> Relación Precipitación y agua precipitada = <i>Cantidad de agua proveniente de la precipitación que no ha sido filtrada, ni ha escurrido.</i>
Modelo V16	#6 L	<p>Agua Subterránea (m3) = $\int ((\text{Filtración desde cuenca} + \text{Recarga}) - \text{Extracción}) - \text{Riego desde acuífero } dt + 1000.0$</p> <p>Descripción: Acumulación de agua en las napas subterráneas (acuíferos)</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Riego desde acuífero = <i>Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos utilizando agua desde un acuífero y medido en m3/year.</i>
Modelo V16	#7 F,A	<p>Alcantarillado (m3/Year) = Traslado Agua Potable*(1- Porcentaje de filtración)</p> <p>Descripción: Flujo de agua ya usada, que se dirige a un centro de tratamiento para ser tratada y nuevamente utilizada.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Agua Potable = <i>Corresponde al agua potable disponible para un sector determinado, y almacenado en torres de agua.</i> Planta de aguas servidas = <i>Corresponde a un centro con un sistema de ingeniería que se encarga de tratar el agua para que pueda ser usadas, para distintos fines.</i> Reposición artificial = <i>Reposición de agua a través de la purificación realizada en plantas de tratamiento de aguas servidas.</i>
Modelo V16	#8 F,A	<p>Caudal de Riego (m3/Year) = Necesidad de Riego+ Riego desde acuífero</p> <p>Descripción: Agua total utilizada para producir alimentos obtenida tras la suma de las variables de riego desde acuífero y necesidad de riego.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Agua en Planta = <i>Corresponde a el agua absorbida por las plantas el riego de las mismas, o la absorción de agua mediante la precipitación.</i>

		<ul style="list-style-type: none"> • Agua en superficie = <i>Corresponde a el agua que se acumula en la superficie terrestre.</i> • Evapotranspiración = <i>Valor de la evapotranspiración en base a la ecuación del balance hídrico.</i> • Riego Total = <i>Igualdad Inputs de riego hacia agua en superficie (Necesidad de Riego - Riego desde acuífero) con output "Caudal de riego".</i>
Modelo V16	#9 C	<p>Conductividad hidráulica (mm/day) = 12000</p> <p>Descripción: Cantidad de agua filtrada diaria en base al tipo de superficie.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Filtración desde cuenca = Filtración de agua desde la cuenca analizada, en este caso el río Claro.
Modelo V16	#10 A	<p>Consumo anual (m3/Year) = Consumo por persona diario* días por año</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Traslado Agua Potable = Extracción de agua desde una cuenca para potabilizarla y distribuirla a la población
Modelo V16	#11 C	<p>Consumo por persona diario (m3/day) = 0.0018</p> <p>Descripción: Cantidad de agua requerida por persona al día según "WHO"</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consumo anual.
Modelo V16	#12 C	<p>Dias por año (day/Year) = 365</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consumo anual. • Filtración desde cuenca = <i>Filtración de agua desde la cuenca analizada, en este caso el río Claro.</i>
Modelo V16	#13 F,A	<p>Esguerrimiento desde montañas (m3/Year) = Segundos por año* Velocidad Caudal Principal</p>

		<p>Descripción: Caudal promedio anual correspondiente al río Maule</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esguerrimiento río abajo = <i>Caudal Efluente Correspondiente al río Maule.</i> • Río Maule = <i>Acumulación de agua en el río maule.</i>
Modelo V16	#14 F,A	<p>Esguerrimiento río abajo (m3/Year) = Esguerrimiento desde montañas- Sub Caudal</p> <p>Descripción: Caudal Efluente Correspondiente al río Maule</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Río Maule = <i>Acumulación de agua en el río maule.</i>
Modelo V16	#15 F,A	<p>Esguerrimiento Subcuenca río abajo (m3/Year) = Sub Caudal-(Traslado Agua Potable+ Filtración desde cuenca)- Necesidad de Riego</p> <p>Descripción: Caudal Efluente correspondiente al río claro</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Río Claro = <i>Acumulación de agua en el río Claro.</i>
Modelo V16	#17 F,A	<p>Evapotranspiración (m3/Year) = Caudal de Riego+ Relación Precipitación y agua precipitada</p> <p>Descripción: Valor de la evapotranspiración en base a la ecuación del balance hídrico.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua en Plantas = <i>Corresponde a el agua absorbida por las plantas el riego de las mismas, o la absorción de agua mediante la precipitación.</i> • Relación Evapotranspiración y Agua en Plantas.
Modelo V16	#16 C	<p>Evapotranspiración en mm (mm/Year) = 1000*365</p>
Modelo V16	#18 F,A	<p>Extracción (m3/Year) = ((Promedio extracción mensual/ litros en m3)*12)</p>

		<p>Descripción: Cantidad de agua subterránea extraída para el consumo humano.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Subterránea = <i>Acumulación de agua en las napas subterráneas (acuíferos).</i> • Traslado Agua Potable = <i>Extracción de agua desde una cuenca para potabilizarla y distribuirla a la población.</i>
Modelo V16	#19 F,A	<p>Filtración desde alcantarillado (m3/Year) = Traslado Agua Potable* Porcentaje de filtración</p> <p>Descripción: Cantidad de agua que se pierde en el transporte de agua a través de las tuberías.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Potable = <i>Corresponde al agua potable disponible para un sector determinado, y almacenado en torres de agua.</i> • Agua filtrándose = <i>Agua que está en proceso de ser filtrada.</i>
Modelo V16	#20 F,A	<p>Filtración desde cuenca (m/Year) = ((Conductividad hidráulica* mm por m)*(Longitud/ Km a m))* días por año</p> <p>Descripción: Filtración de agua desde la cuenca analizada, en este caso el río Claro.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Subterránea = <i>Acumulación de agua en las napas subterráneas (acuíferos).</i> • Esguerrimiento Subcuenca río abajo = <i>Caudal Efluente correspondiente al río claro.</i> • Río Claro = <i>Acumulación de agua en el río Claro.</i>
Modelo V16	#21 F,A	<p>Filtración desde superficie Terrestre (m3/Year) = Filtración por precipitación</p> <p>Descripción: Filtración de agua dejada tras la precipitación.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua en superficie = <i>Corresponde a el agua que se acumula en la superficie terrestre.</i> • Agua filtrándose = <i>Agua que está en proceso de ser filtrada.</i>

		<ul style="list-style-type: none"> Flujo Agua Subterránea = <i>Flujo de agua que tras la precipitación no ha sido filtrada en un acuífero, y se vuelve parte de un caudal subterráneo.</i>
Modelo V16	#22 A	<p>Filtración por precipitación (m3/Year) = Agua Precipitada* Porcentaje de agua filtrada</p> <p>Descripción: Porcentaje de agua que se espera se filtre tras la precipitación.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Filtración desde superficie Terrestre = <i>Filtración de agua dejada tras la precipitación.</i>
Modelo V16	#24 F,A	<p>Flujo Agua Subterránea (m3/Year) = (Agua Precipitada- Filtración desde superficie Terrestre)+ Riego Total</p> <p>Descripción: Flujo de agua que tras la precipitación no ha sido filtrada en un acuífero, y se vuelve parte de un caudal subterráneo.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Agua en superficie = <i>Corresponde a el agua que se acumula en la superficie terrestre.</i>
Modelo V16	#25 C,F	<p>Incremento anual de producción (Dmnl) = Valor Inicial Producción* Porcentaje de incremento</p> <p>Usado Por</p> <ul style="list-style-type: none"> Volumen de producción Superficie total destinada a la producción de alimentos
Modelo V16	#27 C	<p>Km a m (m/km) = 1000</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Filtración desde cuenca = <i>Filtración de agua desde la cuenca analizada, en este caso el río Claro.</i>
Modelo V16	#28 C	<p>litros en m3 (l/m3) = 1000</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Extracción = <i>Cantidad de agua subterránea extraída para el consumo humano.</i>

Modelo V16	#29 C	<p>Longitud (km) = 42</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Filtración desde cuenca = <i>Filtración de agua desde la cuenca analizada, en este caso el río Claro.</i>
Modelo V16	#30 C	<p>m2 por km2 (m2/km2) = 1e+06</p> <p>Descripción: valor utilizado para transformar los km2 a m2.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Superficie terrestre = <i>Superficie total de la intersección entre la comuna de San Clemente y la cuenca del río Claro.</i>
Modelo V16	#31 C	<p>mm por m (m/mm) = 1000</p> <p>Descripción: Valor utilizado para transformar los milímetros a metros.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Filtración desde cuenca = <i>Filtración de agua desde la cuenca analizada, en este caso el río Claro.</i> Precipitación en metros = <i>Transformación del valor de la precipitación de mm a metros.</i>
Modelo V16	#33 A	<p>Necesidad de agua (m3/s) = Agua necesaria en m3* Volumen de producción</p> <p>Descripción: Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos en m3/s y calculada a través de la multiplicación del agua necesaria por m3 con el volumen de producción medido en hectáreas</p> <p>Usado Por</p> <ul style="list-style-type: none"> Necesidad de Riego <i>Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos utilizando agua desde una cuenca, como lo es el río Claro y medido en m3/year</i> <input checked="" type="checkbox"/> <i>Variable de apoyo para cálculo de la necesidad de agua subterránea para producir en m3/s</i>

Modelo V16	#34 F,A	<p>Necesidad de Riego (m3/Year) $= (\text{Necesidad de agua} * \text{Segundos por año}) * (1 - \text{Porcentaje riego desde acuifero})$</p> <p>Descripción: Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos utilizando agua desde una cuenca, como lo es el río Claro y medido en m3/year.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua en superficie = <i>Corresponde a el agua que se acumula en la superficie terrestre.</i> • Caudal de Riego = <i>Agua total utilizada para producir alimentos obtenida tras la suma de las variables de riego desde acuifero y necesidad de riego.</i> • Escurrimiento Subcuenca río abajo = <i>Caudal Efluente correspondiente al río claro.</i> • Riego Total = <i>Igualdad Inputs de riego hacia agua en superficie (Necesidad de Riego - Riego desde acuifero) con output "Caudal de riego".</i> • Río Claro = <i>Acumulación de agua en el río Claro.</i>
Modelo V16	#35 C	<p>Perdida por intercepción (Dmnl) $= 0.12$</p> <p>Descripción: Porcentaje de agua que no llega a la superficie porque es interceptada por las plantas.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Precipitada \equiv <i>Cantidad de agua precipitada que llega a la superficie y no ha sido interceptada por las plantas.</i> https://www.conaf.cl/protocolo-plantaciones/Documentos-y-estudios/Proteccion-de-suelos-y-agua/Relaciones_PpEV.pdf
Modelo V16	#36 L	<p>Planta de aguas servidas (m3) $= \int \text{Alcantarillado- Reposición artificial } dt + 0.0$</p> <p>Descripción: Corresponde a un centro con un sistema de ingeniería que se encarga de tratar el agua para que pueda ser usadas, para distintos fines.</p>
Modelo V16	#37 C	<p>Población (Dmnl) $= 40000$</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Traslado Agua Potable = <i>Extracción de agua desde una cuenca para potabilizarla y distribuirla a la población.</i>

Modelo V16	#38 C	<p>Porcentaje de agua filtrada (Dmnl) = 0.15</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Filtración por precipitación = <i>Porcentaje de agua que se espera se filtre tras la precipitación.</i>
Modelo V16	#39 C	<p>Porcentaje de filtración (Dmnl) = 0.17</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Alcantarillado = <i>Flujo de agua ya usada, que se dirige a un centro de tratamiento para ser tratada y nuevamente utilizada.</i> Filtración desde alcantarillado = <i>Cantidad de agua que se pierde en el transporte de agua a través de las tuberías.</i>
Modelo V16	#40 C	<p>Porcentaje de reducción (Dmnl) = 0</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Reducción por aumento de eficiencia.
Modelo V16	#41 C	<p>Porcentaje riego desde acuífero (Dmnl) = 0.18</p> <p>Descripción: Estimación del porcentaje de agua subterránea utilizada para la producción de alimentos.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Necesidad de Riego = <i>Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos utilizando agua desde una cuenca, como lo es el río Claro y medido en m³/year.</i> X = <i>Variable de apoyo para cálculo de la necesidad de agua subterránea para producir en m³/s</i>
Modelo V16	#42 A	<p>Precipitación en metros (mm) = mm por m* Precipitación en mm</p> <p>Descripción: Transformación del valor de la precipitación de mm a metros.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Precipitación Total = <i>Cantidad de precipitación anual, adecuada a la superficie utilizada en el modelo.</i>

Modelo V16	#43 C	<p>Precipitación en mm (mm) = 386</p> <p>Descripción: Precipitación medida en milímetros.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precipitación en metros = <i>Transformación del valor de la precipitación de mm a metros.</i>
Modelo V16	#44 F,A	<p>Precipitación Total (m3/Year) = Precipitación en metros* Superficie terrestre</p> <p>Descripción: Cantidad de precipitación anual, adecuada a la superficie utilizada en el modelo.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Precipitada = Cantidad de agua precipitada que llega a la superficie y no ha sido interceptada por las plantas. https://www.conaf.cl/protocolo-plantaciones/Documentos-y-estudios/Proteccion-de-suelos-y-agua/Relaciones_PpEV.pdf • Agua en Plantas = Corresponde a el agua absorbida por las plantas el riego de las mismas, o la absorción de agua mediante la precipitación. • Relación Precipitación y agua precipitada = Cantidad de agua proveniente de la precipitación que no ha sido filtrada, ni ha escurrido.
Modelo V16	#45 C	<p>Promedio extracción mensual (Lt/s) = 105</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Extracción = <i>Cantidad de agua subterránea extraída para el consumo humano.</i>
Modelo V16	#46 F,A	<p>Recarga (m3/Year) = Agua filtrándose/ Tiempo para transitar</p> <p>Descripción: Recarga de agua en los acuíferos subterráneos.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Subterránea = <i>Acumulación de agua en las napas subterráneas (acuíferos).</i> • Agua filtrándose = <i>Agua que está en proceso de ser filtrada.</i>
Modelo V16	#47 F,A	<p>Reducción por aumento de eficiencia (Dmnl) = Agua necesaria por unidad producida* Porcentaje de reducción</p>

		<p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua necesaria por unidad producida = <i>Agua necesaria para producir algún producto alimenticio.</i>
Modelo V16	#48 A	<p>Relación Evapotranspiración y Agua en Plantas () = Evapotranspiración/ Agua en Plantas</p>
Modelo V16	#49 A	<p>Relación Precipitación y agua precipitada (m3/Year) = Precipitación Total- Agua Precipitada</p> <p>Descripción: Cantidad de agua proveniente de la precipitación que no ha sido filtrada, ni ha escurrido.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evapotranspiración = <i>Valor de la evapotranspiración en base a la ecuación del balance hídrico.</i>
Modelo V16	#50 F,A	<p>Reposición artificial (m3/Year) = Alcantarillado</p> <p>Descripción: Reposición de agua a través de la purificación realizada en plantas de tratamiento de aguas servidas.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Planta de aguas servidas = <i>Corresponde a un centro con un sistema de ingeniería que se encarga de tratar el agua para que pueda ser usadas, para distintos fines.</i>
Modelo V16	#51 F,A	<p>Riego desde acuífero (m3/Year) Riego desde acuífero=A FUNCTION OF(Riego desde acuífero, Agua subterránea, Y) = IF THEN ELSE</p> <p>Descripción: Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos utilizando agua desde un acuífero y medido en m3/year.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Subterránea = <i>Acumulación de agua en las napas subterráneas (acuíferos).</i> • Agua en superficie = <i>Corresponde a el agua que se acumula en la superficie terrestre.</i> • Caudal de Riego = <i>Agua total utilizada para producir alimentos obtenida tras la suma de las variables de riego desde acuífero y necesidad de riego.</i>

		<ul style="list-style-type: none"> Riego Total = <i>Igualdad Inputs de riego hacia agua en superficie (Necesidad de Riego - Riego desde acuífero) con output "Caudal de riego"</i>.
Modelo V16	#52 A	<p>Riego Total (m3/Year) = Caudal de Riego-(Necesidad de Riego+ Riego desde acuífero)</p> <p>Descripción: Igualdad Inputs de riego hacia agua en superficie (Necesidad de Riego - Riego desde acuífero) con output "Caudal de riego"</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Flujo Agua Subterránea = <i>Flujo de agua que tras la precipitación no ha sido filtrada en un acuífero, y se vuelve parte de un caudal subterráneo.</i>
Modelo V16	#53 L	<p>Río Claro (m3) = \int Sub Caudal-(((Esgurrimiento Subcuenca río abajo+ Filtración desde cuenca)+ Necesidad de Riego)+ Traslado Agua Potable) dt + 10000.0</p> <p>Descripción: Acumulación de agua en el río Claro</p>
Modelo V16	#54 L	<p>Río Maule (m3) = \int(Esgurrimiento desde montañas- Esgurrimiento río abajo)- Sub Caudal dt + 0.0</p> <p>Descripción: Acumulación de agua en el río maule</p>
Modelo V16	#56 C	<p>Segundos por año (s/Year) = 24*3600*365</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Esgurrimiento desde montañas = <i>Caudal promedio anual correspondiente al río Maule.</i> Necesidad de Riego = <i>Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos utilizando agua desde una cuenca, como lo es el río Claro y medido en m3/year.</i> Sub Caudal = <i>Caudal promedio anual correspondiente a una subcuenca que deriva de una cuenca principal, en este caso el caudal del río Claro al salir del río Maule.</i> Y = <i>Variable de apoyo para la transformación de la necesidad de agua subterránea para producir de m3/s a m3/year.</i>

Modelo V16	#57 F,A	<p>Sub Caudal (m3/Year) = Velocidad Caudal Subcuenca* Segundos por año</p> <p>Descripción: Caudal promedio anual correspondiente a una subcuenca que deriva de una cuenca principal, en este caso el caudal del río Claro al salir del río Maule.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Esguerrimiento Subcuenca río abajo = <i>Caudal Efluente correspondiente al río claro.</i> • Esguerrimiento río abajo = <i>Caudal Efluente Correspondiente al río Maule.</i> • Río Claro = <i>Acumulación de agua en el río Claro.</i> • Río Maule = <i>Acumulación de agua en el río maule.</i>
Modelo V16	#58 A	<p>Superficie terrestre (m2/km2) = 1169* m2 por km2</p> <p>Descripción: Superficie total de la intersección entre la comuna de San Clemente y la cuenca del río Claro.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precipitación Total = <i>Cantidad de precipitación anual, adecuada a la superficie utilizada en el modelo.</i>
Modelo V16	#59 C	<p>Tiempo para transitar (Year) = 30</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recarga = <i>Recarga de agua en los acuíferos subterráneos.</i>
Modelo V16	#62 F,A	<p>Traslado Agua Potable (m3/Year) = (Consumo anual* Población)- Extracción</p> <p>Descripción: Extracción de agua desde una cuenca para potabilizarla y distribuirla a la población.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Agua Potable = <i>Corresponde al agua potable disponible para un sector determinado, y almacenado en torres de agua.</i> • Alcantarillado = <i>Flujo de agua ya usada, que se dirige a un centro de tratamiento para ser tratada y nuevamente utilizada.</i> • Esguerrimiento Subcuenca río abajo = <i>Caudal Efluente correspondiente al río claro.</i> • Filtración desde alcantarillado = <i>Cantidad de agua que se pierde en el transporte de agua a través de las tuberías.</i>

		<ul style="list-style-type: none"> Río Claro = <i>Acumulación de agua en el río Claro.</i>
Modelo V16	#63 LI,C	<p>Valor inicial (m3) = 1.68968e+18</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Agua filtrándose = <i>Agua que está en proceso de ser filtrada.</i>
Modelo V16	#64 C	<p>Velocidad Caudal Principal (m3/s) = 467</p> <p>Descripción: Caudal Anual Promedio del río Maule.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Escurrimiento desde montañas = <i>Caudal promedio anual correspondiente al río Maule.</i>
Modelo V16	#65 C	<p>Velocidad Caudal Subcuenca (m3/s) = 16.4</p> <p>Descripción: Caudal promedio anual correspondiente al río Claro.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Sub Caudal = <i>Caudal promedio anual correspondiente a una subcuenca que deriva de una cuenca principal, en este caso el caudal del río Claro al salir del río Maule.</i>
Modelo V16	#66 L,F	<p>Volumen de producción (Dmnl) = $\int \text{Volumen de producción} * \text{Incremento anual de producción } dt + 100.0$</p> <p>Descripción: Cantidad de productos producidos.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Necesidad de agua = <i>Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos en m3/s.</i>
Modelo V16	#67 A	<p>X (m3/s) = Necesidad de agua* Porcentaje riego desde acuífero</p> <p>Descripción: Variable de apoyo para cálculo de la necesidad de agua subterránea para producir en m3/s.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> Y = <i>Variable de apoyo para la transformación de la necesidad de agua subterránea para producir de m3/s a m3/year.</i>
Modelo V16	#68 A	<p>Y (m3/Year) = X* Segundos por año</p>

		<p>Descripción: Variable de apoyo para la transformación de la necesidad de agua subterránea para producir de m3/s a m3/year.</p> <p>Usado por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Riego desde acuífero = <i>Cantidad de agua necesaria para la producción de alimentos utilizando agua desde un acuífero y medido en m3/year.</i>
Modelo V16	#69 C	<p>Porcentaje de incremento (Dmnl) = 0</p> <p>Usado Por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incremento anual de producción
Modelo V16	#70 C	<p>Porcentaje de reducción (Dmnl) = 0</p> <p>Usado Por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reducción por aumento de eficiencia
Modelo V16	#71 C	<p>Valor Inicial Producción (km2) = 600</p> <p>Usado Por</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incremento anual de producción. • Volumen de producción Superficie total destinada a la producción de alimentos.
Modelo V16	#72 C	<p>Km2 a Hectareas (km2/Ha) = 100</p> <p>Usado Por</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Volumen de producción</u> Superficie total destinada a la producción de alimentos

ANEXO V. Tabla Evapotranspiración total año 2019

Tabla 8 Tabla Evapotranspiración total año 2019

2019						
Mes	Temperatura Min	Temperatura Max	Humedad Min	Humedad Maxima	Velocidad del viento a 2m	Evapotranspiración Total
	C°	C°	%	%	Kt	Mm
Enero	7.20	37.50	11.20	92.20	0.99	165.33
Febrero	8.00	30.50	10.60	84.14	0.92	130.39
Marzo	2.50	31.90	10.60	95.70	0.96	109.72
Abril	1.40	30.60	15.60	97.80	0.51	52.37
Mayo	-1.60	22.20	22.40	100	0.50	27.41
Junio	-0.20	20.70	37.00	100	0.16	17.89
Julio	0.2	10.6	58.8	100	1.4	27.10
Agosto	1.5	13.3	51.1	100	0.2	28.60
Septiembre	-1.70	25.50	27.30	100	0.83	67.10
Octubre	-1.10	26.40	11.60	100	0.92	81.80
Noviembre	4.50	32.40	15.10	100	1.28	127.14
Diciembre	6.90	33.30	11.20	100	1.38	177.23
Resultados Anuales	-1.70	37.50	10.60	100.00	0.84	1012.09

ANEXO VI. Tabla Evapotranspiración total año 2020

Tabla 9 Tabla Evapotranspiración total año 2020

2020						
Mes	Temperatura Min	Temperatura Max	Humedad Min	Humedad Maxima	Velocidad del viento a 2m	Evapotranspiración Total
	C°	C°	%	%	Kt	Mm
Enero	7.80	34.10	9.90	100.00	1.07	170.80
Febrero	5.90	34.80	8.80	100.00	0.91	142.10
Marzo	4.70	35.40	9.50	100.00	0.70	103.19
Abril	5.00	31.60	19.40	93.00	1.10	75.78
Mayo	2.80	19.80	49.90	100.00	0.20	33.21
Junio	-1.10	13.70	45.50	100.00	0.40	20.17
Julio	1.40	13.60	0.10	100.00	0.43	25.11
Agosto	-1.2	22	59.8	97.8	0.3	26.58
Septiembre	0.70	27.00	18.70	97.40	1.06	80.32
Octubre	-0.60	29.20	20.00	96.60	1.36	117.01
Noviembre	6.90	30.90	14.60	94.80	1.11	147.95
Diciembre	8.00	33.90	11.00	94.80	1.32	181.07
Resultados Anuales	-1.20	35.40	0.10	100.00	0.83	1123.29

ANEXO VII. Tabla Evapotranspiración total año 2021

Tabla 10 Tabla Evapotranspiración total año 2021

2021						
Mes	Temperatura Min	Temperatura Max	Humedad Min	Humedad Maxima	Velocidad del viento a 2m	Evapotranspiración Total
	C°	C°	%	%	Kt	Mm
Enero	6.40	35.00	15.40	94.20	0.89	160.40
Febrero	8.00	34.10	21.20	100.00	0.40	96.45
Marzo	4.50	33.30	18.90	95.50	0.44	95.30
Abril	6.47	21.65	47.08	94.16	0.26	45.16
Mayo	0.20	21.00	39.90	100.00	0.24	24.51
Junio	-4.40	20.40	43.10	100.00	0.50	19.89
Julio	-2.50	18.70	43.20	97.80	0.61	22.93
Agosto	-1.80	21.40	34.40	100.00	0.52	33.22
Septiembre	2.40	21.60	36.80	97.00	0.55	51.08
Octubre	3.50	24.70	30.10	95.50	1.45	103.64
Noviembre	7.10	30.60	23.60	90.60	0.86	145.06
Diciembre	10.20	33.30	12.10	88.30	0.50	138.84
Resultados Anuales	-4.40	35.00	12.10	100.00	0.60	936.47

ANEXO VIII. Tabla Evapotranspiración total año 2022

Tabla 11 Tabla Evapotranspiración total año 2022

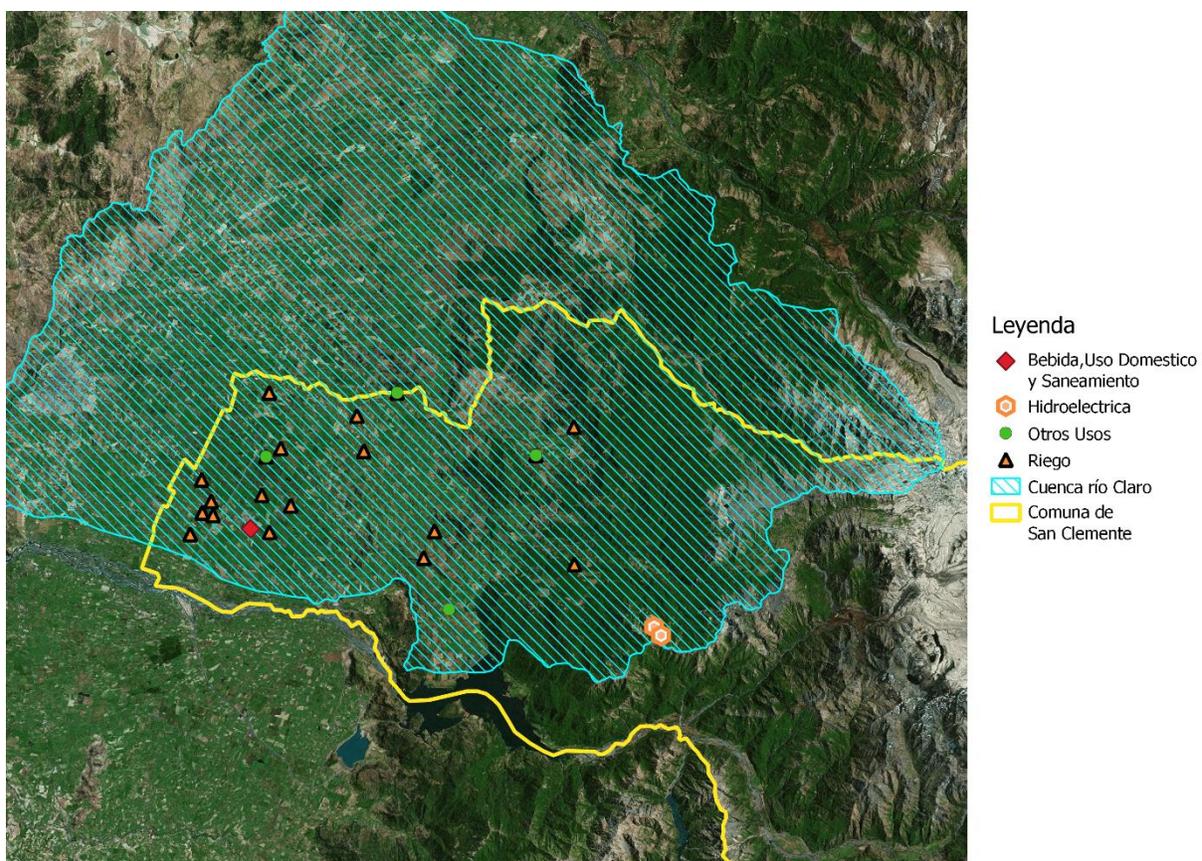
2022						
Mes	Temperatura Min	Temperatura Max	Humedad Min	Humedad Maxima	Velocidad del viento a 2m	Evapotranspiración Total
	C°	C°	%	%	Kt	Mm
Enero	7.80	34.00	23.30	92.00	0.76	155.87
Febrero	7.70	38.50	9.30	92.80	0.85	138.22
Marzo	5.60	29.50	13.30	94.40	1.04	109.00
Abril	1.00	26.40	18.00	97.90	0.57	53.83
Mayo	-3.30	20.10	45.30	98.00	0.42	24.75
Junio	-4.10	19.80	37.00	98.30	0.34	19.62
Julio	-1.10	17.50	46.00	97.40	0.41	22.42
Agosto	-2.20	24.00	37.20	97.50	0.65	36.48
Resultados Anuales	-4.10	38.50	9.30	98.30	0.63	560.19

ANEXO IX. Derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro (2019-2022)

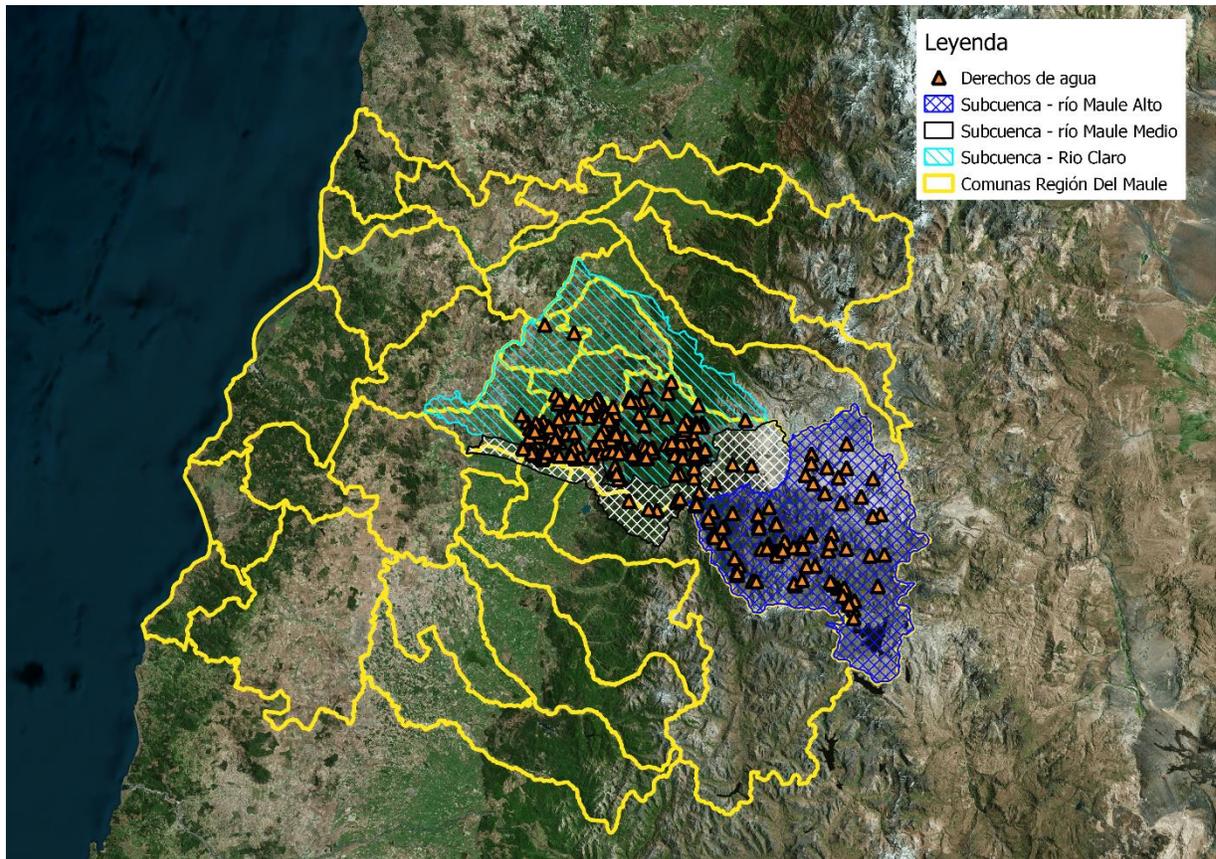
Tabla 12 Derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro (2019-2022)

Region	Provincia	Comuna	Tipo de Derecho	Uso Agua	Cuenca	SubCuenca	Ejercicio de derecho	Caudal Anual Promedio	Unidad Caudal	Año
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Riego	Rio Maule	Rio Claro	Permanente y Continuo	34.0 Lt/s		2019
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Riego	Rio Maule	Rio Claro	Permanente y Continuo	51.5 Lt/s		2021
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Riego	Rio Maule	Rio Claro	Permanente y Continuo	49.9 Lt/s		2021
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Otros Usos	Rio Maule	Rio Claro	Permanente y Continuo	49 Lt/s		2021
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Riego	Rio Maule	Rio Claro	Permanente y Continuo	25.0 Lt/s		2022
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Riego	Rio Maule	Rio Claro	Permanente y Continuo	48.0 Lt/s		2022
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Riego	Rio Maule	Rio Claro	Permanente y Continuo	48.0 Lt/s		2022

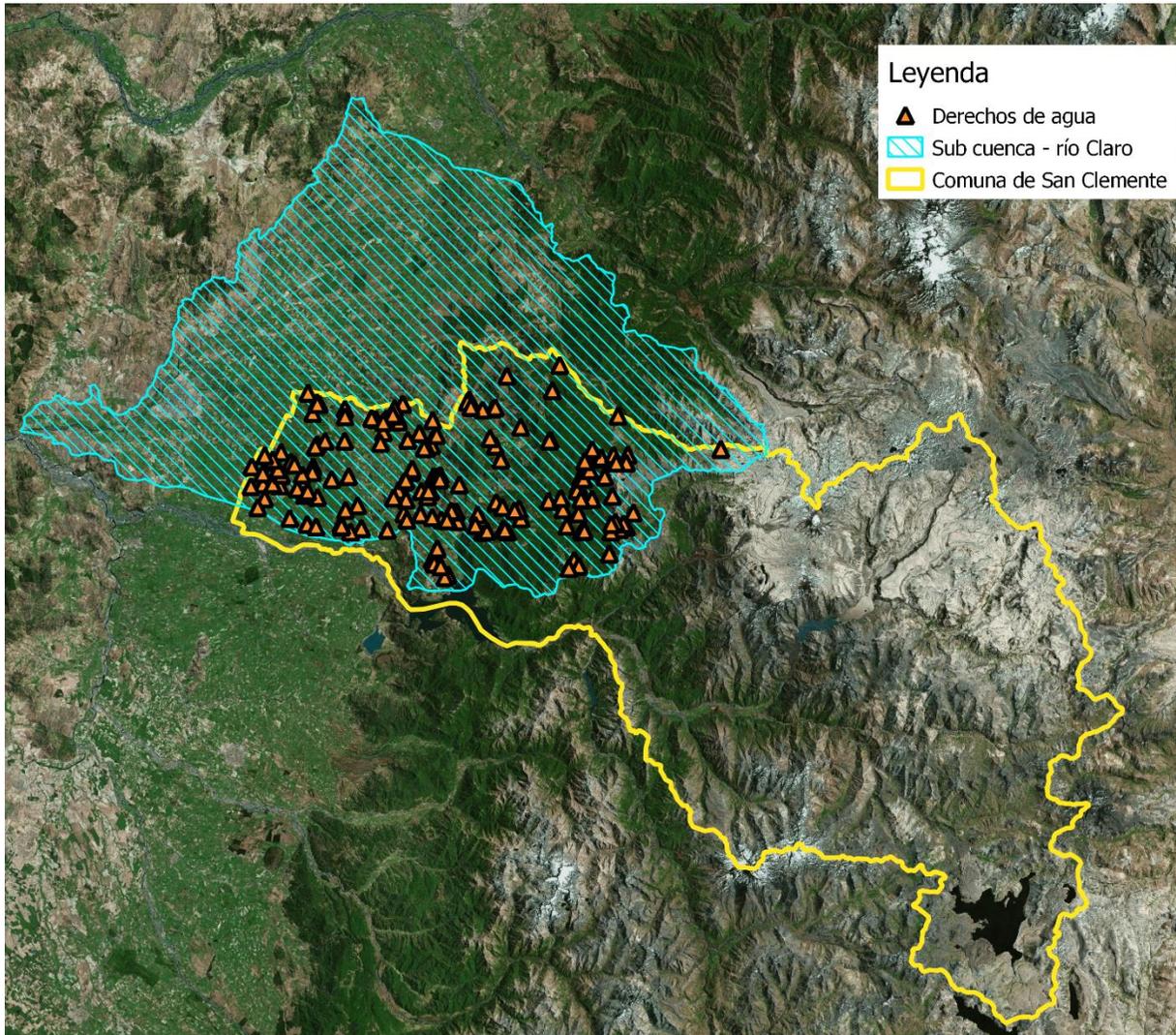
ANEXO X. Mapa tipos de derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro (2019 - 2022)



ANEXO XI. Mapa derecho de agua San Clemente, considerando subcuencas río Claro, Maule Medio y Maule Alto



ANEXO XII. Mapa derecho de agua San Clemente, subcuenca río Claro



ANEXO XIII. Tabla Valores Precipitación 2019 – 2021

Tabla 13 Tabla Valores Precipitación 2019 – 2021

2019	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Total Mensual		0.6	1.9	4.8	127.3	92	33.7	9.2	46.6	17.9	0.3	0.1
Acumulado Anual		0.6	2.5	7.3	134.6	226.6	260.3	269.5	316.1	334	334.3	334.4
Maximo 24 Horas		0.4	1.7	2.3	46.3	17.7	11.2	2.2	8.6	7.5	0.3	0.1
Suma Parcial		0.6	1.9	4.8	127.3	92	33.7	9.2	46.6	17.9	0.3	0.1

2020	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Total Mensual			0.1		39.2	220.6	159.1	62.9	41.7	5.3		
Acumulado Anual			0.1	0.1	39.3	259.9	419	481.9	523.6	528.9	528.9	528.9
Maximo 24 Horas			0.1		27.9	63.2	27.6	17.3	30.6	2.9		
Suma Parcial			0.1		39.2	220.6	159.1	62.9	41.7	5.3		

2021	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Total Mensual		0.6	0.9	11.1	127.8	87.4	27.6	100.7	48.6	4.2	1.3	0.5
Acumulado Anual	0	0.6	1.5	12.6	140.4	227.8	255.4	356.1	404.7	408.9	410.2	410.7
Maximo 24 Horas		0.5	0.3	6.7	43.4	26.6	14.7	47.4	28.9		1.3	0.5
Suma Parcial	44.9	0.6	0.9	11.1	127.8	87.4	27.6	100.7	48.6	4.2	1.3	0.5

ANEXO XIV. Tabla Uso Consuntivo Agua subterránea.

Tabla 14 Tabla Uso Consuntivo Agua subterránea.

Región	Provincia	Comuna	Tipo de Derecho	Natur. Agu	Clasif. Fue	Uso Agua	Cuenca	SubCuenca	Ejercicio de derecho	Caudal Anual Promedio	Unidad Caudal	Año
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	31,0 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	75 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	46,6 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	10,0 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	66,0 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	41,5 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	4,0 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	2,0 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	60,0 L/s		2017
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	10,5 L/s		2018
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	94,0 L/s		2018
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Bebedizo Domo	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	105 L/s		2018
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	90,0 L/s		2018
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	34,0 L/s		2019
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	51,5 L/s		2021
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	49,9 L/s		2021
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	25,0 L/s		2022
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	48,0 L/s		2022
Maule	Talca	San Clemente	Consuntivo	Subterránea	Acuífero	Riego	Río Maule	Río Claro	Permanente y Continuo	48,0 L/s		2022

ANEXO XVI. Tabla Valores Simulación 2 Agua Subterránea

Tabla 16 Tabla Valores Simulación 2 Agua Subterránea

Time (Year)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Agua Subterránea : Con Cambios	0.00E+00	2.96E+16	5.72E+16	8.28E+16	1.07E+17	1.28E+17	1.49E+17	1.67E+17	1.84E+17	1.99E+17	2.12E+17	2.25E+17	2.35E+17	2.45E+17	2.52E+17	2.59E+17
Agua Subterránea : Sin Cambios	0.00E+00	5.63E+16	1.11E+17	1.63E+17	2.14E+17	2.63E+17	3.11E+17	3.57E+17	4.01E+17	4.44E+17	4.86E+17	5.26E+17	5.65E+17	6.02E+17	6.39E+17	6.74E+17
Extracción : Con Cambios	2.67E+16	2.67E+16														
Extracción : Sin Cambios	1.47E+09	1.47E+09														
Necesidad de Riego : Con Cambios	2.59E+06	6.21E+06	1.49E+07	3.57E+07	8.58E+07	2.06E+08	4.94E+08	1.19E+09	2.85E+09	6.83E+09	1.64E+10	3.93E+10	9.44E+10	2.27E+11	5.44E+11	1.31E+12
Necesidad de Riego : Sin Cambios	2.59E+06	2.59E+06														
Recarga : Con Cambios	5.63E+16	5.43E+16	5.23E+16	5.04E+16	4.86E+16	4.68E+16	4.51E+16	4.35E+16	4.19E+16	4.03E+16	3.88E+16	3.74E+16	3.60E+16	3.46E+16	3.33E+16	3.21E+16
Recarga : Sin Cambios	5.63E+16	5.44E+16	5.26E+16	5.09E+16	4.92E+16	4.76E+16	4.60E+16	4.44E+16	4.30E+16	4.15E+16	4.01E+16	3.88E+16	3.75E+16	3.63E+16	3.51E+16	3.39E+16
Riego desde acuífero : Con Cambios	0.00E+00	1.36E+06	3.27E+06	7.85E+06	1.88E+07	4.52E+07	1.08E+08	2.60E+08	6.25E+08	1.50E+09	3.60E+09	8.64E+09	2.07E+10	4.98E+10	1.19E+11	2.87E+11
Riego desde acuífero : Sin Cambios	0.00E+00	5.68E+05	5.68E+05													
Time (Year)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Agua Subterránea : Con Cambios	2.64E+17	2.69E+17	2.72E+17	2.73E+17	2.74E+17	2.74E+17	2.72E+17	2.70E+17	2.66E+17	2.61E+17	2.54E+17	2.44E+17	2.26E+17	1.94E+17	1.25E+17	
Agua Subterránea : Sin Cambios	7.08E+17	7.40E+17	7.72E+17	8.03E+17	8.32E+17	8.61E+17	8.89E+17	9.15E+17	9.41E+17	9.66E+17	9.90E+17	1.01E+18	1.04E+18	1.06E+18	1.08E+18	
Extracción : Con Cambios	2.67E+16															
Extracción : Sin Cambios	1.47E+09															
Necesidad de Riego : Con Cambios	3.13E+12	7.52E+12	1.80E+13	4.33E+13	1.04E+14	2.49E+14	5.99E+14	1.44E+15	3.45E+15	8.28E+15	1.99E+16	4.77E+16	1.14E+17	2.75E+17	6.59E+17	
Necesidad de Riego : Sin Cambios	2.59E+06															
Recarga : Con Cambios	3.09E+16	2.97E+16	2.85E+16	2.74E+16	2.64E+16	2.54E+16	2.44E+16	2.34E+16	2.25E+16	2.16E+16	2.07E+16	1.99E+16	1.91E+16	1.83E+16	1.75E+16	
Recarga : Sin Cambios	3.28E+16	3.17E+16	3.06E+16	2.96E+16	2.86E+16	2.77E+16	2.67E+16	2.59E+16	2.50E+16	2.42E+16	2.34E+16	2.26E+16	2.18E+16	2.11E+16	2.04E+16	
Riego desde acuífero : Con Cambios	6.88E+11	1.65E+12	3.96E+12	9.51E+12	2.28E+13	5.48E+13	1.31E+14	3.15E+14	7.57E+14	1.82E+15	4.36E+15	1.05E+16	2.51E+16	6.03E+16	1.25E+17	
Riego desde acuífero : Sin Cambios	5.68E+05															