



Universidad de Concepción



Facultad de Ciencias Ambientales

Huella Hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu, para evaluación de la sostenibilidad ambiental.

Tesis para optar al grado de

Ingeniero Ambiental

Reinaldo Muñoz González

Profesor guía: Dr. En ciencias ambientales Mauricio Aguayo Arias.

Concepción, Chile

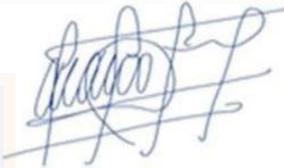
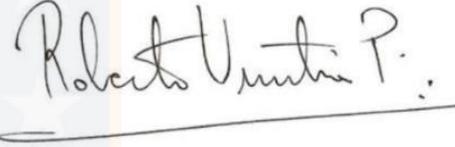
2019

“Huella hídrica de la cuenca del lago Llu-Lleu, para evaluación de sostenibilidad ambiental”

Profesor Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias

Profesor Comisión: Dr. Roberto Urrutia Pérez

Profesor Comisión: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza


CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, octubre 2023

Índice

Índice de tablas	ii
Índice de figuras	iii
Resumen	v
1.1. Antecedentes de consumo de agua a nivel mundial.	1
1.2. Antecedentes de estrés hídrico en Chile.	5
1.2.1. Proyecciones climáticas a futuro.	7
1.3. Plantaciones Forestales en Chile.	8
1.4. Huella Hídrica.	12
1.4.1. Definición de objetivos de alcance	14
1.4.2. Contabilidad de la huella hídrica.	15
1.4.2.2. Evapotranspiración diaria (ETc, mm/día).....	16
1.4.2.3. Huella Hídrica gris.....	21
1.4.3. Análisis de sostenibilidad de huella hídrica.	23
1.4.3.1. Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.....	25
1.4.3.2. Caudal mínimo ecológico (CME).....	26
1.4.4. Formulación de respuestas a la huella hídrica.....	28
2. Pregunta de investigación y objetivos	30
2.1. Preguntas de investigación.....	30
2.2. Objetivos.	30
3. Materiales y métodos	31
3.1. Área de estudio.	31
3.2. Determinación de la Variabilidad Climática.....	34
3.2.1. Temperatura y Precipitación.	34
3.2.2. Evapotranspiración de referencia (ETo).	36
3.3. Estimación de la huella hídrica total (HH) de la cuenca del lago Lleu-Lleu.	37
3.3.1. Identificación de la superficie de la cuenca cubierta por vegetación.	38
3.3.2. Evapotranspiración del cultivo (ETc).	41
3.3.3. Factor Kc de los cultivos.	42
3.3.4. Huella hídrica verde y huella hídrica azul de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	45
3.4. Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.....	47
4. Resultados.....	48
4.1 Variabilidad Climática.....	48

4.2 Huella hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu	49
4.3 Huella hídrica de los cultivos, de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	52
4.4. Análisis de sostenibilidad.	56
5. Discusión	57
5.1. Variabilidad Climática.....	57
5.2. Factor Kc de los cultivos y Evapotranspiración real de los cultivos (ETc).....	58
5.3. Huella Hídrica.	59
5.4. Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica.....	61
6. Conclusión	64
7. Bibliografía	65
8. Anexos.....	70

Índice de tablas

Tabla 4.1.1 Variabilidad Climática de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	48
Tabla 4.2.1 Superficie cubierta por vegetación evaluada de forma mensual, en la cuenca del lago Lleu-Lleu	49
Tabla 4.2.2 Factor de cultivo Kc, Evapotranspiración diaria de los cultivos (ETc) y Huella Hídrica mensual (HH) de la cuenca del lago Lleu-Lleu, año 2019.	50
Tabla 4.2.3 Precipitación efectiva (Peffect), Evapotranspiración verde (ET verde) y Evapotranspiración azul (ET azul) de la cuenca del lago Lleu-Lleu	51
Tabla 4.2.4 Huella hídrica verde (HH verde) y huella hídrica azul (HH azul) de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	51
Tabla 4.3.1 Factor Kc de los cultivos de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu	52
Tabla 4.3.2 Evapotranspiración real (ETc) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	53
Tabla 4.3.3 Área (ha) cubierta por vegetación, de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	54
Tabla 4.3.4 Huella hídrica(m3/mes) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu.	55
Tabla 4.4.1 Escorrentía total (Et) y escorrentía natural (Enat), de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	56
Tabla 4.4.2. Caudal mínimo ecológico (CME), disponibilidad de agua azul (DA azul) y escasez de agua azul (EA azul) de la cuenca del lago Lleu-Lleu.	56

Tabla 8.1 “error” de las interpolaciones mensuales “Kriging” e “IDW”, realizadas en el software ArcGis 10.8 a los valores mensuales del factor Kc de los cultivos de las cuencas del lago Lleu-Lleu.	70
---	----

Índice de figuras

Figura 1.1. Extracciones mundiales de agua 1900-2010 (AQUASTAT, 2010).	2
Figura 1.2. Línea de base de estrés hídrico mundial (WRI, 2021).	5
Figura 1.3. Índice de sequía compuesto por el índice estandarizado de precipitaciones e Índice de anomalías Vegetación de Diferencias Normalizada de NDVI (ENCCRV, 2021).	6
Figura 1.2.1.1. Proyecciones de temperaturas máximas futuras, para el período 2030-2060 (CR2)..7	
Figura 1.2.1.2. Proyecciones de precipitaciones futuras, para el período 2030-2060 (CR2).	8
Figura 1.3.1. Superficie Plantaciones forestales en Chile (INFOR, 2020).	9
Figura 1.3.2. Plantaciones forestales por región (CONAF, 2015).	10
Figura 1.4.1. Cuatro fases diferentes para la evaluación de la huella hídrica (Hoekstra et al, 2011).	13
Figura 1.4.2.2.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o), bajo condiciones estándar (ET _c) y bajo condiciones no estándar (ET _{c aj}), (FAO,1972).	17
Figura 1.4.2.2.2. Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo (FAO,1972).	20
Figura 3.1.1. Localización Geográfica de la cuenca del lago Lleu-Lleu (Elaboración propia).	32
Figura 3.1.2. Uso de suelo cuenca Lleu-Lleu (CONAF 2015).	33
Figura 3.2.1. Capas ráster de precipitaciones y temperaturas de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (CR2).	35
Figura 3.2.2. Obtención de datos mensuales de temperaturas y precipitaciones (elaboración propia).	36
Figura 3.2.2.1 Evapotranspiración de referencia (ET _o) de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (Climateengine.org).	37
Figura 3.3.1.1. Incendios forestales en la cuenca del lago Lleu-Lleu, período 2015-2019 (CONAF). 38	
Figura 3.3.1.2. índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019, (earthexplorer.gov.com).	40
Figura 3.3.1.3. Valores de NDVI menores a 0.2 de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (elaboración propia).	41
Figura 3.3.3.1 Valores de Kc puntuales de los suelos cubiertos por vegetación en la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (Elaboración propia).	42

Figura 3.3.3.2. Valores de NDVI menores a 0.2, valores de Kc superpuestos a valores de NDVI menor a 0.2 y valores de Kc borrados de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (elaboración propia).....	43
Figura 3.3.3.3. Valores de NDVI menor a 0.2 y Valores de Kc de los suelos cubiertos por vegetación en la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (Elaboración propia).	43
Figura 3.3.3.4. Metodología para la obtención de los valores de Kc mensual de los suelos cubiertos por vegetación en la cuenca del lago Lleu-Lleu (elaboración propia).....	44
Figura 4.1.1 Climograma de la cuenca del lago Lleu-Lleu, año 2019.	49
Figura 4.2.1 Factor Kc de los cultivos y Evapotranspiración de los cultivos (ETc), de la cuenca del lago Lleu-Lleu	50
Figura 4.2.2 Huella hídrica total, huella hídrica verde y huella hídrica azul de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	52
Figura 4.3.1 Factor Kc mensual de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu	53
Figura 4.3.2 Evapotranspiración real (ETc) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	54
Figura 4.3.3. Huella hídrica (HH) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu. ...	55
Figura 4.3.4. Escasez de agua azul (EA azul), de la cuenca del lago LLeu-Lleu (2019).....	57
Figura 5.1.1. Temperatura promedio, Evapotranspiración de referencia y Evapotranspiración de los cultivos de la cuenca del lago Lleu-Lleu, 2019.....	58
Figura 5.2.1. Temperatura promedio y factor Kc de los cultivos de la cuenca del lago Lleu-Lleu, 2019.	58
Figura 5.3.1. Huella hídrica total, huella hídrica azul y temperatura promedio de la cuenca del lago Lleu-Lleu.....	60
Figura 5.3.2. Huella hídrica verde y temperatura promedio de la cuenca del lago Lleu-Lleu, año 2019.	60
Figura 5.4.1. Escases de agua azul y temperatura promedio de la cuenca del lago Lleu-Lleu, 2019.	62

Resumen

El consumo de agua a nivel mundial ha aumentado de forma significativa en el último siglo, registrándose un consumo de agua superior a los 4.000 km³ en el año 2010. Este consumo de agua ha generado distintos escenarios de estrés hídrico, que a menudo son más estacionales que anuales.

Chile no es la excepción a este escenario. En las regiones de Ñuble y Biobío el índice de sequía se ha intensificado debido a la disminución de las precipitaciones, el aumento de temperaturas y el aumento de incendios forestales. Las proyecciones climáticas futuras no auguran un buen escenario, ya que hacia el 2060 las temperaturas promedio y máximas continuarían aumentando y las precipitaciones disminuyendo.

Es en este contexto que se ha masificado el cultivo de plantaciones forestales, superando los 2 millones de hectáreas en el 2020, concentrándose el 75% de estos cultivos en las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y la Araucanía.

Los bosques en general y las plantaciones forestales en particular involucran una mayor cantidad de agua en la evapotranspiración., lo que provoca una disminución en la escorrentía, acentuándose este escenario en los meses de mayores temperaturas.

Según la información entregada por CONAF (2015), en la cuenca del lago Lleu-Lleu, las plantaciones forestales superan el 50% del suelo de la cuenca, lo que, sumado al escenario climático, se hace imperativo un estudio de huella hídrica para determinar si se está superando el consumo del total de agua disponible, lo que provocaría una violación del caudal mínimo ecológico, caudal mínimo necesario para preservar la biodiversidad del ecosistema.

Se evaluó la huella hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu de forma mensual, durante el año 2019 y su sostenibilidad ambiental, llegando a consumir casi el 90% del total de agua disponible en un mes del período evaluado. Las plantaciones forestales de *Eucalyptus Glóbulus* y *Pinus Radiata* presentaron la mayor tasa evapotranspirativa a diferencia de la vegetación nativa de la cuenca.

Si bien la cuenca del lago Lleu-Lleu no presentó ningún cuadro de insostenibilidad hídrica, las proyecciones climáticas futuras indican que el estudio de huella hídrica (no solo de la cuenca en evaluación), debería ser constante para identificar zonas críticas que estén más propensas a presentar escenarios de insostenibilidad ambiental.

1. Introducción

1.1. Antecedentes de consumo de agua a nivel mundial.

A escala global, el agua dulce no es escasa. Sin embargo, la disponibilidad de los recursos hídricos no es la misma en los diferentes continentes, ni tampoco existe una relación entre la población y la disponibilidad de agua dulce. Además, en cada continente existe disparidad entre regiones, algunas de las cuales se encuentran en situaciones extremas de desarrollo, se pueden detectar grandes diferencias entre ciudades, pueblos y comunidades de la misma región. La escasez de agua dulce puede generar conflictos tanto entre países como dentro de un mismo país o región. Algunos líderes mundiales ya han anunciado que el acceso de agua dulce será una de las principales fuentes de conflicto en el mundo, de hecho, ya hace tiempo que es motivo de disputa entre países. A lo largo de la historia de la humanidad, asegurar el acceso al agua dulce ha sido vital para la estabilidad social de las culturas y las civilizaciones. El acceso al agua dulce se convirtió en una fuente de poder o en una fuente de discordia que ha generado grandes conflictos desde tiempos inmemoriales. Se conocen experiencias desafortunadas de antiguas civilizaciones poderosas que llegan al colapso por una mala gestión del agua dulce (De Robles, 2007).

Los ecosistemas de agua dulce son extremadamente productivos y gran parte de lo que producen puede ser utilizado por el hombre. Los recursos forestales, los recursos naturales y silvestres, la pesca, los recursos de forraje, los recursos agrícolas y los recursos energéticos no son más que unas pocas de las categorías de los productos derivados de los ecosistemas de agua dulce. El valor de estos productos suele medirse en millones de dólares al año en

cada lugar y representa una importante fuente de ingresos tanto para las comunidades rurales como para las urbanas (Bucher et al, 1997).

A nivel mundial, el uso de agua dulce se ha incrementado por un factor de seis en los últimos 100 años (Figura 1.1) y continúa creciendo a un ritmo de aproximadamente el 1% anual desde la década de 1980 (AQUASTAT, s.f.). La tasa de crecimiento de la demanda de agua dulce sigue aumentando en la mayoría de las economías emergentes, así como en los países de ingresos medios y bajos, aun cuando esta tasa disminuyó en la mayoría de los Estados miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), donde las tasas per cápita de uso del agua tienden a ser de las más altas en el mundo (Ritchie y Roser, 2018). Gran parte de este incremento puede atribuirse a una combinación del crecimiento de la población, al desarrollo económico y a los cambios en los patrones de consumo.

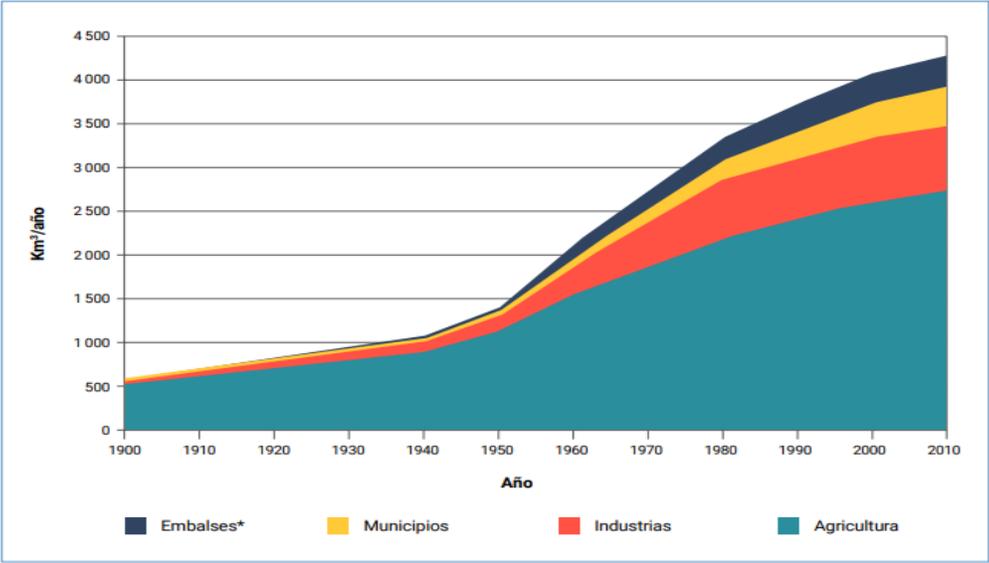


Figura 1.1. Extracciones mundiales de agua 1900-2010 (AQUASTAT, 2010).

Actualmente, la agricultura representa el 69% de las extracciones de agua a nivel mundial, utilizadas principalmente para riego, así como para ganadería y acuicultura. Esta proporción puede alcanzar hasta el 95% en algunos países en desarrollo (FAO, 2011a). La industria (incluyendo la energía y generación de energía) representa el 19%, mientras que los municipios son responsables del 12% restante.

La OCDE (2012) proyectó que la demanda mundial de agua aumentará un 55% entre los años 2000 y 2050. Wada *et al.* (2016) estimó que el uso mundial del agua probablemente seguirá creciendo a una tasa anual de alrededor del 1%, lo que resultará para el año 2050, en un aumento de 20 a 30% por encima del nivel de uso de agua actual.

Si bien la magnitud exacta del aumento real del uso mundial del agua sigue siendo incierta, la mayoría de los autores coinciden en que el uso del agua agrícola se enfrentará a un creciente competencia y que la mayor parte del crecimiento del uso del agua se verá impulsado por una creciente demanda de los sectores industrial y energético, así como por los usos municipales y domésticos, principalmente en función del desarrollo industrial y por la mejora de la cobertura de los servicios de agua y saneamiento de los países en desarrollo y de las economías emergentes (OCDE, 2012)

La organización para la agricultura y la ganadería (FAO), de las naciones unidas declaró lo siguiente en el año 2021:

“El balance hídrico mundial se encuentra bajo presión. Los recursos hídricos renovables internos de los ríos y acuíferos ascienden a 44 000 km³ /año, y las extracciones (de todos los sectores) superan los 4 000 km³ /año, lo que representa casi el 10% de estos recursos. Las

repercusiones locales de la escasez física de agua y la contaminación de las aguas dulces se están propagando y acelerando. En muchos casos, el primer indicio de escasez derivada del aumento de las extracciones es el descenso de los niveles freáticos” (FAO, 2021).

El estrés hídrico, esencialmente medido como el uso del agua en función del suministro disponible, afecta a muchas partes del mundo (Figura 1.2). Más de dos mil millones de personas viven en países que sufren estrés hídrico (Organización de las Naciones Unidas, 2018). Sin embargo, el estrés del agua físico es a menudo un fenómeno estacional más que anual. Se estima que cuatro mil millones de personas viven en zonas donde sufren escasez grave de agua física por lo menos durante un mes cada año (Mekonnen y Hoekstra, 2011).

Es probable que el cambio climático aumente la variabilidad estacional, creando un suministro de agua más errático e incierto, exacerbando así los problemas en las zonas ya estresadas por el agua y generando un potencial estrés hídrico en lugares donde todavía no ocurre como fenómeno recurrente. Varios de los principales acuíferos del mundo están bajo un creciente estrés, asimismo, se está agotando el 30% de los sistemas más grandes de aguas subterráneas (Richey et al, 2015).

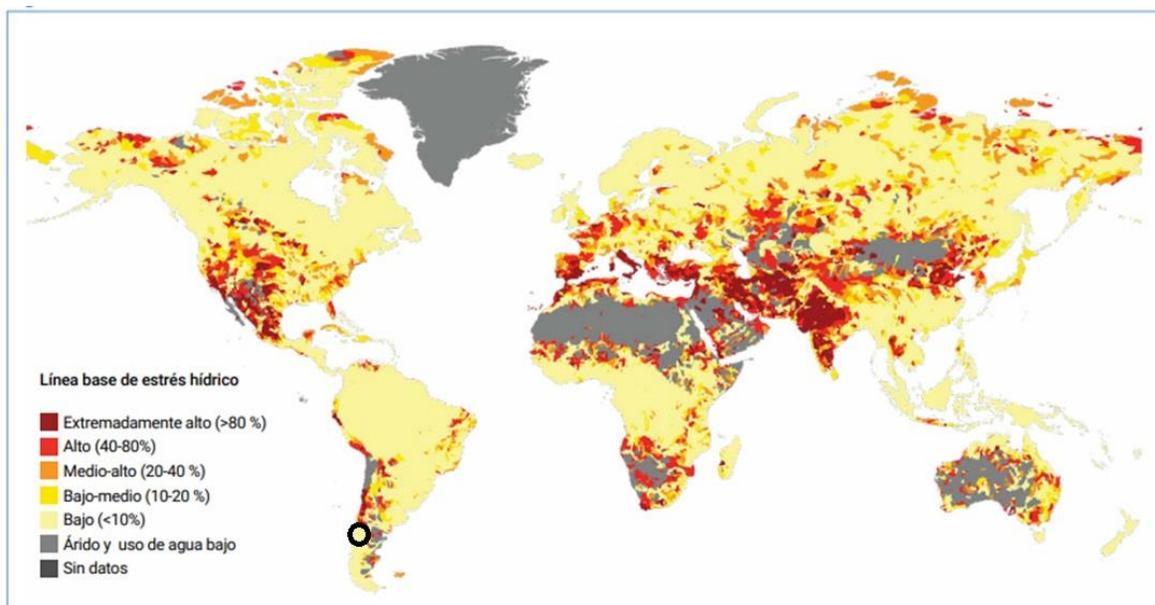


Figura 1.2. Línea de base de estrés hídrico mundial (WRI, 2021).

1.2. Antecedentes de estrés hídrico en Chile.

En Chile, la corporación nacional forestal (CONAF) a través de su Unidad de Cambio Climático y servicios Ambientales (UCCSA), formuló la Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV) 2017 – 2025, la cual tiene como objetivo “Disminuir la vulnerabilidad social, ambiental y económica que genera el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía sobre los recursos vegetacionales y comunidades humanas que dependen de éstos, a fin de aumentar la resiliencia de los ecosistemas y contribuir a mitigar el cambio climático fomentando la reducción y captura de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile” (CONAF, 2016).

Un sistema de evaluación y monitoreo de la desertificación, la degradación de tierras y sequías debe contribuir a crear capacidades para anticipar los potenciales efectos que pueden tener estos fenómenos sobre la productividad silvoagropecuaria, la cual es una dimensión

económica-social y sobre la conservación de las especies y ecosistemas, la cual es la dimensión ambiental del problema (ENCCVR, 2017).

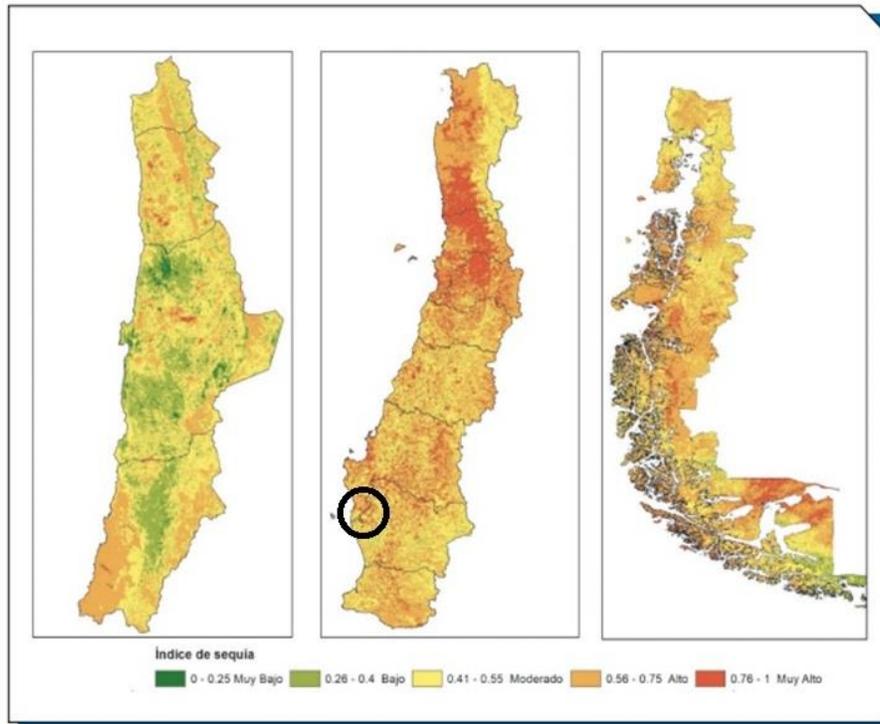


Figura 1.3. Índice de sequía compuesto por el índice estandarizado de precipitaciones e Índice de anomalías Vegetación de Diferencias Normalizada de NDVI (ENCCRV, 2021).

A partir de la Región de Coquimbo se aprecia una intensificación del riesgo de sequía como consecuencia de la disminución de las precipitaciones y un deterioro de la cubierta vegetal, situación que se extiende hasta la Región de Valparaíso y parte norte de la cuenca de Santiago. Esta tendencia está asociada probablemente a un desplazamiento del límite austral del desierto de Atacama, lo que estaría asociado a una tendencia secular en la posición del anticiclón del Pacífico (ENCCVR, 2017).

A partir de la Región de O'Higgins la intensidad de las sequías se atenúan ligeramente, si bien se mantienen altas en una proporción significativa del territorio (ENCCVR, 2017).

En las zonas costeras y precordillerana de O'Higgins y Maule el riesgo tiende a bajar a niveles moderados. Esto último es probablemente debido no a una condición climática sino a una mayor presencia de vegetación arbórea con cierta resiliencia frente al déficit hídrico (ENCCVR, 2017).

En las regiones de Ñuble y Biobío se produce una intensificación de los riesgos de sequías lo que puede estar asociado a una intensificación negativa de la precipitación y a una mayor incidencia de incendios forestales que tiende a reducir los valores de cobertura vegetal (ENCCVR, 2017).

1.2.1. Proyecciones climáticas a futuro.

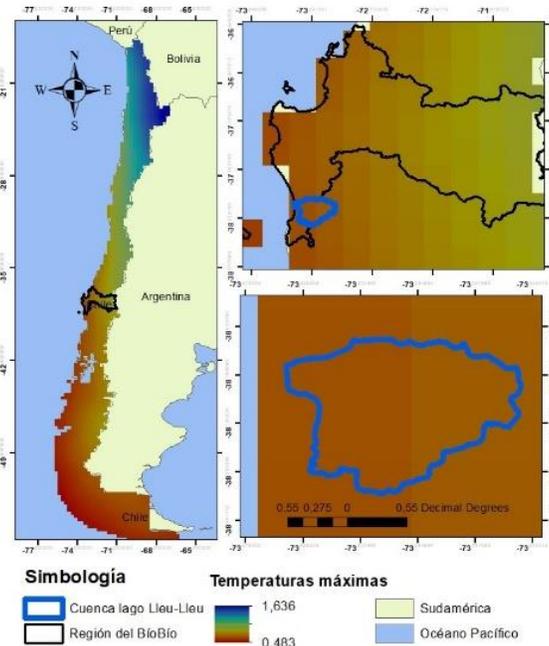


Figura 1.2.1.1. Proyecciones de temperaturas máximas futuras, para el período 2030-2060 (CR2).

Para la cuenca del lago Lleu-Lleu, se espera que entre el 2030 y el 2060 aumente en $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura máxima y $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura media aproximadamente.

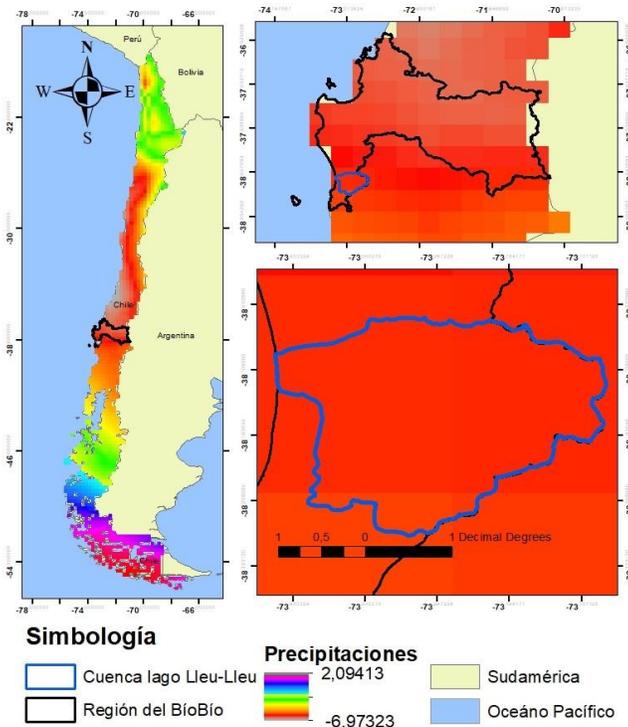


Figura 1.2.1.2. Proyecciones de precipitaciones futuras, para el período 2030-2060 (CR2).

Se espera que las precipitaciones disminuirían en un promedio de 5,8%, para el período 2030-2060, en la cuenca del lago Lleu-Lleu (CR2).

Un aumento de las temperaturas máximas y temperaturas promedio, además de la disminución de las precipitaciones, favorecerían escenarios de estrés hídrico a futuro.

1.3. Plantaciones Forestales en Chile.

Los bosques en general y las plantaciones forestales en particular involucran una mayor cantidad de agua en la evapotranspiración y registran una superior pérdida de agua por

intercepción del dosel en comparación a otros tipos de cubierta vegetal. La magnitud de estos alcances pasa por las características de las plantaciones (especie, edad y manejo), particularidades de las precipitaciones (cantidad e intensidad) y de las condiciones meteorológicas (Huber et al, 2008).

Las plantaciones forestales del país alcanzan los 2,329 millones de hectáreas a diciembre 2020. El bosque nativo en Chile se concentra entre las regiones de Coquimbo y Aysén, con un total de 13,424 millones de ha (INFOR, 2020).

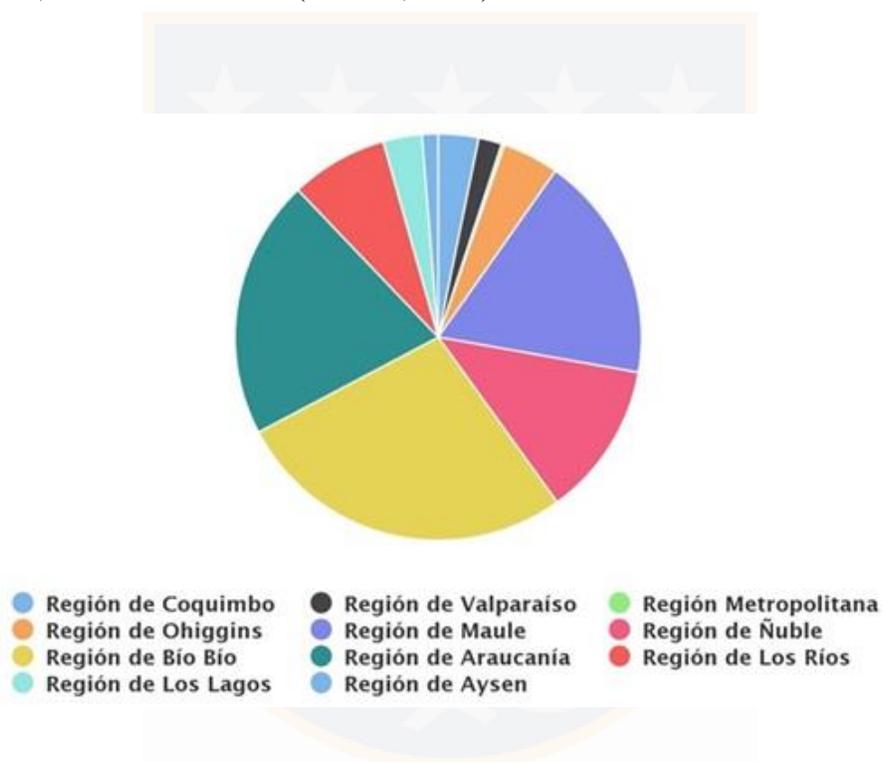


Figura 1.3.1. Superficie Plantaciones forestales en Chile (INFOR, 2020).

La mayor cantidad de superficie cubierta por plantaciones forestales se da en las regiones de Maule (419.328 ha), Ñuble (286.536 ha), Biobío (633.471 ha) y La Araucanía (480.035 ha). La región del Biobío posee un total de 786.208 ha de bosque nativo. (INFOR, 2020).

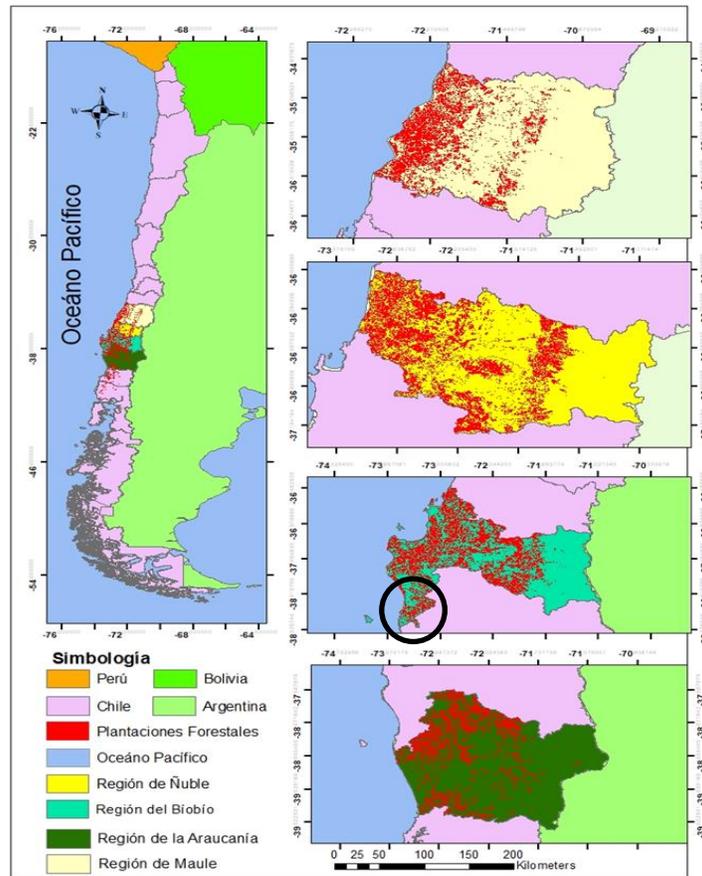


Figura 1.3.2. Plantaciones forestales por región (CONAF, 2015).

El consumo de agua de las plantaciones forestales o de cualquier cultivo, varía dependiendo de diferentes factores, como el clima, la especie de árbol, el suelo y la edad de la plantación. En general, las plantaciones jóvenes requieren más agua que las plantaciones maduras. En climas cálidos y húmedos, las plantaciones forestales pueden consumir grandes cantidades de agua debido a la alta transpiración de los árboles. En climas secos, el consumo de agua de las plantaciones forestales puede ser menor debido a la reducción de la transpiración de los árboles. Sin embargo, las plantaciones forestales en climas secos también

pueden ser más propensas a la sequía, lo que puede afectar el crecimiento y la supervivencia de los árboles.

Además, el tipo de especie de árbol también afecta al consumo de agua de las plantaciones forestales. Algunas especies de árboles requieren más agua que otras, y algunas son más tolerantes a la sequía.

El suelo también juega un papel importante en el consumo de agua de las plantaciones forestales. Los suelos bien drenados permiten una mayor retención de agua y un mejor acceso del agua a las raíces de los árboles, mientras que los suelos compactados y con baja capacidad de retención de agua pueden limitar el acceso del agua a las raíces de los árboles.

En general el consumo de agua de las plantaciones forestales es un proceso complejo que depende de varios factores ambientales.

En el estudio “Impacto hidrológico de plantaciones forestales en cuencas de la región del Maule”, el autor Martínez-conde (2022), señala: “Los escenarios simulados para el periodo histórico entre los años 1985 y 2020 muestran que, al aumentar la superficie de las plantaciones forestales, la escorrentía disminuye y evapotranspiración aumenta. Por otro lado, los escenarios de disminución de los monocultivos forestales, sucede el efecto contrario. Esto se debe a la profundidad de las raíces de estos bosques. Además, “En tanto las simulaciones de los escenarios bajo proyecciones de cambio climático (periodo 2030 – 2060) mantienen la misma tendencia que los escenarios en el periodo histórico, en este caso, las variaciones de escorrentía y evapotranspiración se agudizan, a consecuencia de un aumento del estrés hídrico”.

Debido a la situación mundial que vive el planeta y el país con respecto al agua dulce y su utilización, se hace imperativo estimar el consumo de agua de las distintas actividades

productivas en cada zona, con el objetivo de elaborar políticas consistentes para el uso sostenible de los recursos naturales.

1.4. Huella Hídrica.

El concepto de Huella Hídrica, fue introducido por Hoekstra & Hung, en el año 2002 y representa un indicador útil para estimar de manera fiable el consumo de agua invertido en la producción de bienes o asociado a los distintos sectores de la actividad económica (Hoekstra & Hung, 2005; Allan, 2006).

En el manual de evaluación de Huella Hídrica de la FAO (organismo de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura), los autores definen a la huella hídrica de la siguiente manera:

“La Huella Hídrica es un indicador del uso de agua dulce que no se centra únicamente en el uso directo del agua por parte de un consumidor a un productor, sino que se centra también en su uso indirecto. La Huella hídrica puede considerarse un indicador integral de la apropiación de los recursos hídricos frente a la medida tradicional y restrictiva del uso de agua. Es el volumen de agua dulce usado para elaborar un producto, medido a lo largo de la cadena de suministro completa. Se trata de un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de consumo por origen y los volúmenes de contaminación por origen de contaminación; todos los componentes del agua dulce total están geográfica y temporalmente especificados. La Huella Hídrica azul se refiere al consumo de los recursos de agua azul (aguas superficiales y subterráneas) a lo largo de una cadena de suministro de un producto. El consumo se refiere a una pérdida de agua de una masa de agua disponible en una zona de captación o cuenca hidrográfica. Las pérdidas ocurren cuando el agua que se evapora regresa a otra cuenca hidrográfica o al mar, o se incorpora a un producto. Asimismo, la Huella

Hídrica verde se refiere al consumo de los recursos de agua verde (el agua de lluvia en la medida que no se convierta en escorrentía); por último, la Huella Hídrica gris se refiere a la contaminación y se define como el volumen de agua dulce requerida para asimilar la carga de contaminantes dada las concentraciones naturales de fondo y las normas de calidad ambiental” (Hoekstra *et al*, 2011).

En resumen, en el manual de evaluación de la huella hídrica de la FAO, la evaluación de la huella hídrica se refiere a todo el conjunto de actividades necesarias para:

1. Cuantificar y localizar la huella hídrica de un proceso, producto, productor o consumidor, o cuantificar en el espacio y el tiempo la huella hídrica en un área geográfica específica.
2. Analizar la sostenibilidad medioambiental, social y económica de esta huella hídrica.
3. Formular una estrategia de respuesta.

En conclusión, para realizar un estudio de huella hídrica se requieren cuatro pasos importantes:

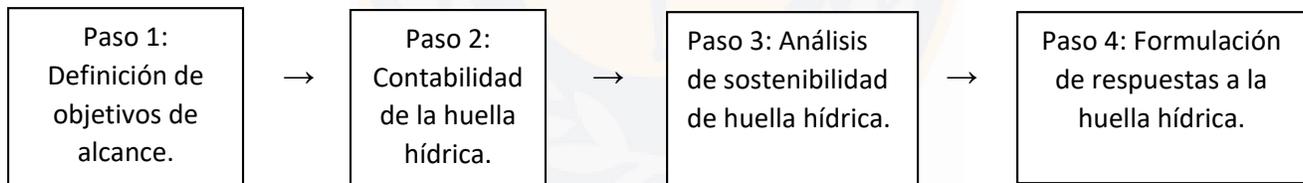


Figura 1.4.1. Cuatro fases diferentes para la evaluación de la huella hídrica (Hoekstra et al, 2011).

1.4.1. Definición de objetivos de alcance

En rasgos generales, el objetivo de la evaluación de la huella hídrica es analizar cómo las actividades humanas o los productores específicos se relacionan con los problemas de la escasez de agua y de su contaminación y estudiar cómo tanto las actividades como los productos pueden llegar a ser más sostenibles desde un punto de vista hídrico (Hoekstra *et al*, 2011).

La huella hídrica dentro de un área geográfica se define como el total del consumo y la contaminación de agua dulce dentro de los límites de un área. Esta área puede ser una zona de captación, una cuenca hidrográfica, una provincia, estado o nación, o cualquier otra unidad espacial hidrológica o administrativa. La huella hídrica de un área geográfica delimitada ($HH_{\text{área}}$), se calcula como la suma de las huellas hídricas de proceso de todos los procesos que consumen agua en la zona:

$$HH_{\text{área}} = \sum_q HH_{\text{proc}}(q) \text{ [volumen/tiempo]}, \text{ (Hoekstra } et \text{ al, 2011).}$$

q

Dónde: $HH_{\text{proc}}(q)$, huella hídrica de un proceso q dentro de un área geográficamente delimitada (Hoekstra et al, 2011).

Para este caso (cuenca del lago Lleu-Lleu), la actividad productiva hegemónica, es la actividad forestal, ya que ocupa la mitad del uso de suelo de la cuenca aproximadamente, no registrándose ninguna otra actividad productiva de gran magnitud. Lo que indicaría que los mayores consumos de agua dentro de la cuenca los tendrían las plantaciones forestales.

Según las capas Shapefile de uso de suelo (CONAF, 2015), que se encuentran disponibles en el sitio web de la CONAF <https://sit.conaf.cl/>, en la cuenca del lago Lleu-Lleu, existen dos especies de cultivo forestal, el *Pinus Radiata* y el *Eucalyptus Glóbulus*.

Además de las plantaciones forestales, dentro de la cuenca del lago Lleu-Lleu, existen otros tipos de vegetación, el bosque nativo y los matorrales.

1.4.2. Contabilidad de la huella hídrica.

Una vez definidos los objetivos de alcance, que, para este caso, es la evaluación de la huella hídrica dentro de una cuenca hidrográfica y durante todo un ciclo hidrológico, lo siguiente es proceder a cuantificar o contabilizar el objetivo propuesto.

1.4.2.1. Huella Hídrica Verde (HH_{verde}) y Huella Hídrica azul (HH_{azul}).

La huella hídrica azul es un indicador del uso de la denominada “agua azul”, es decir, del agua dulce superficial o subterránea. La huella hídrica verde es un indicador del uso que hacen los seres humanos de la llamada agua verde, que se refiere a las precipitaciones terrestres que no se transforman en escorrentía ni en aguas subterráneas, sino que se almacenan en el suelo o se quedan de forma temporal en la superficie del suelo o de la vegetación (Hoekstra et al, 2011).

Los componentes verde y azul en la huella hídrica dentro de una cuenca hidrográfica es el resultado de la evaluación de la evapotranspiración diaria del cultivo (ET_c , mm/día) sobre la superficie de cobertura del cultivo, o sea la huella hídrica dentro de una zona de captación o cuenca hidrográfica es la ET_c multiplicada por la superficie del cultivo para quedar expresada en unidades de [Volumen/tiempo]. (Hoekstra *et al*, 2011).

Los usos de agua de cultivo verde y azul, son el resultado del cálculo de la evapotranspiración diaria del cultivo (ET_c , mm/día), (Hoekstra *et al*, 2011), durante todo el ciclo en estudio.

1.4.2.2. Evapotranspiración diaria (ETc, mm/día).

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (FAO,1972).

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) (Figura 1.4.2.2.1). ETo es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ETc se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ETc requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo (FAO,1972).

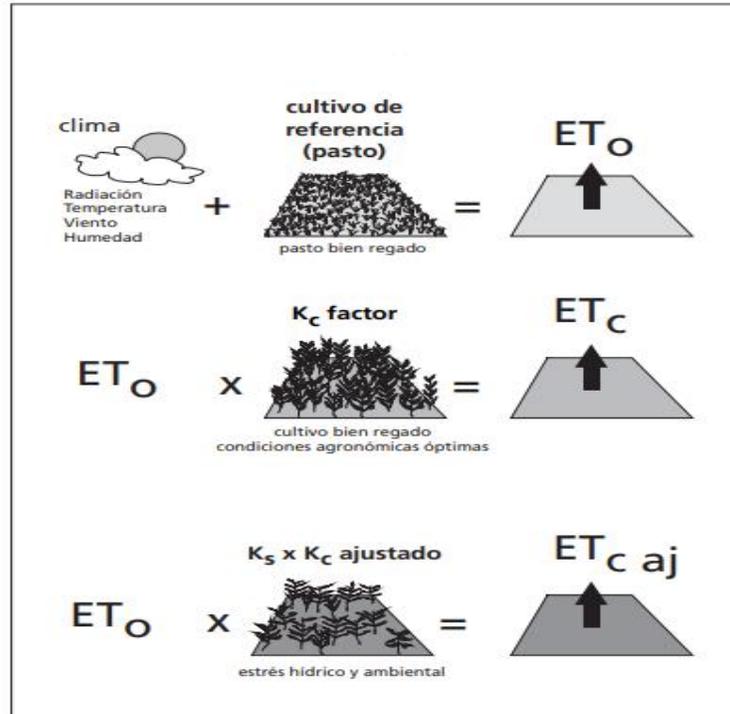


Figura 1.4.2.2.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$), (FAO,1972).

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0). Por lo tanto, mientras ET_0 representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas (FAO,1972).

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_0 . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas (FAO,1972).

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ETo en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia (FAO,1972).

Los únicos factores que afectan ETo son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ETo es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ETo de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes (FAO,1972).

El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente Kc. Por último,

debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c (FAO,1972). En general, el K_c de diferentes cultivos que tengan una mayor necesidad de consumo de agua, puede superar el valor de 1. Cuando no se da esta condición, ya sea por la etapa de crecimiento del cultivo, o algún otro factor externo el valor de K_c es menor a la unidad (FAO,1972).

Debido a las diferencias en albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas, así como características de los estomas y hojas de las plantas, se presentarán diferencias entre la evapotranspiración de un cultivo bien desarrollado y regado y la de referencia E_{To} (FAO,1972).

Las variaciones en la velocidad del viento afectan el valor de la resistencia aerodinámica de los cultivos y por lo tanto los valores del coeficiente del cultivo, especialmente en aquellos cultivos que posean una altura significativamente mayor a la del cultivo hipotético del pasto. La diferencia entre la resistencia aerodinámica del pasto de referencia y la de otros cultivos agrícolas es no sólo específica del tipo de cultivo, sino que depende además de las condiciones climáticas y la altura del cultivo (FAO,1972).

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo del período de crecimiento del mismo. Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada (FAO,1972).

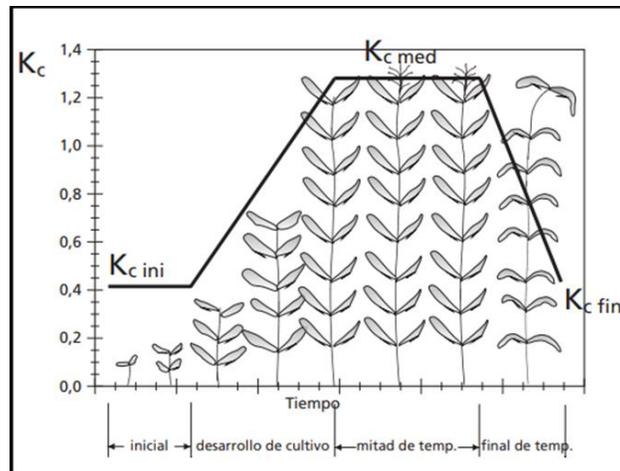


Figura 1.4.2.2.2. Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo (FAO,1972).

La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima. El final de la etapa inicial ocurre cuando la vegetación verde cubre aproximadamente un 10% de la superficie del suelo. Para cultivos permanentes, la fecha de siembra es reemplazada por el momento en que aparecen las primeras hojas. Durante el período inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el período inicial (K_c ini) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca (FAO, 1972).

La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. Para una gran variedad de cultivos, el estado de cobertura completa ocurre al inicio de la floración (FAO,1972).

La etapa de mediados de temporada comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ETo de referencia. La etapa de mediados de temporada representa la etapa más larga para los cultivos permanentes y para una gran variedad de cultivos anuales, siendo relativamente corta para los cultivos hortícolas que son cosechados frescos para aprovechar su vegetación verde. Durante la etapa de mediados de temporada, el coeficiente Kc alcanza su valor máximo (FAO,1972).

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de Kc y ETc finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas (FAO,1972).

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de Kc y ETc finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas (FAO,1972).

Si los valores de Kc cumplen con la condición $K_c = K_{c aj}$, la evapotranspiración de los cultivos (ETc), calculada con estos valores de Kc, será igual a $ET_c = ET_{c aj}$.

1.4.2.3. Huella Hídrica gris.

La huella hídrica gris se calcula dividiendo la carga de contaminante (L, en masa/tiempo), entre la diferencia entre la norma de calidad ambiental de agua de ese contaminante (la

concentración máxima permitida $C_{m\acute{a}x}$, en masa/volumen) y su concentración natural en la masa de agua receptora (C_{nat} , en masa/volumen) (Hoekstra *et al*, 2011).

La huella hídrica gris es un indicador del grado de contaminación de agua dulce, que se define como el volumen de agua dulce que se necesita para eliminar la carga de contaminantes basado en las concentraciones en condiciones naturales y en las normas o legislación de calidad ambiental del agua existentes. El concepto de huella hídrica gris surgió del reconocimiento de que la magnitud de contaminación del agua puede expresarse en términos de volumen de agua necesario para diluir los contaminantes de forma que se vuelvan inocuos (Hoekstra *et al*, 2011).

Es la concentración de nutrientes en el agua, especialmente el nitrógeno, además de fosforo, DBO5, o cualquier fertilizante aplicado en los monocultivos. Además, existe la posibilidad que el agua esté contaminada con herbicidas, ya que, al momento de sembrar las plántulas de estos árboles, en muchos casos agrícolas y forestales, se rocía el suelo con un herbicida no selectivo, para que no crezca ninguna vegetación nativa o endémica. Ya durante el transcurso del crecimiento de las plantaciones, se rocía el suelo con herbicidas selectivos, para conseguir que solo se mantenga en pie, los monocultivos forestales. El efecto de un exceso de nutrientes, es acelerar el proceso trófico natural de los cuerpos de agua, Parra *et al*, (2003), calificó al lago Lleu-Lleu en estado oligotrófico.

Otro factor a considerar sobre la huella hídrica gris es el transporte de sedimentos. Este proceso se da al momento de la cosecha de los árboles. Al no existir cubierta vegetal se produce una mayor escorrentía superficial durante eventos de lluvia (Iroumé *et al*, 2006). Cuando se cosechan grandes extensiones de cultivos, estas grandes extensiones quedan al descubierto de la lluvia y por lo tanto habrá un mayor movimiento de suelos, debido a la nula interceptación, sobre todo en lugares con pendientes altas Inevitablemente esta cantidad o un

porcentaje de materia llegará a los lugares con pendientes más bajas, pudiendo ingresar una parte importante de sedimentos al cuerpo de agua de la cuenca. El efecto que tiene esta llegada de sedimentos es un aumento en la turbiedad del agua. La turbiedad impide que exista un buen traspaso de luz, por lo que inhibe la actividad fotosintética dentro del agua, lo que provoca que se genere oxígeno dentro de ésta (Hoekstra et al, 2011).

1.4.3. Análisis de sostenibilidad de huella hídrica.

La sostenibilidad de los recursos hídricos consumidos en un proceso, un producto, o por un consumidor o productor, depende de sus propias características, como son el tamaño de la huella hídrica, duración, ubicación, color, entre otras; y de las condiciones del área geográfica (Hoekstra et al, 2009).

La sostenibilidad hídrica se refiere a la gestión y el uso sostenible del agua para satisfacer las necesidades presentes y futuras de las personas y los ecosistemas. Esto incluye garantizar el acceso al agua potable, el uso eficiente del agua, la protección de los recursos hídricos y la prevención de la contaminación del agua.

La sostenibilidad hídrica implica la implementación de políticas y prácticas que promuevan un uso del agua equitativo, eficiente y sostenible. Esto incluye la promoción de la conservación y la eficiencia en el uso del agua, la protección de los recursos hídricos y la reducción de la contaminación del agua. Es importante promover el acceso al agua potable a todos los niveles y garantizar que se realice una gestión de cuenca integrada y participativa para la toma de decisiones.

Además, el enfoque en la sostenibilidad hídrica también implica una consideración de las variaciones en el clima y los cambios climáticos, ya que estos pueden afectar la disponibilidad y calidad del agua. Es importante adaptarse a cambios en las precipitaciones, los patrones de escorrentía y el aumento del nivel del mar, para poder garantizar un suministro de agua fiable en el futuro.

La mejor manera de analizar la sostenibilidad de la huella hídrica total en un área geográfica es hacerlo considerando la zona de captación o cuenca hidrográfica. En el ámbito de una unidad hidrológica como esta, es posible comparar la huella hídrica verde o azul con la disponibilidad de agua verde o azul, o la huella hídrica gris con la capacidad disponible de asimilación de cargas de contaminantes (Hoekstra et al, 2011).

La evaluación de la sostenibilidad hídrica en una cuenca hidrográfica se puede evaluar cuantificando los índices de sostenibilidad verde, azul y gris. Además, los intervalos de tiempo en donde los índices arrojen resultados severos, se catalogan como puntos críticos de huella hídrica (Hoekstra et al, 2011).

Hay que admitir que el tema de analizar la escasez de agua verde es un terreno prácticamente sin explorar. La dificultad reside en la estimación de la disponibilidad de agua verde. Principalmente faltan datos sobre las necesidades de agua verde de los ecosistemas y sobre las cantidades de evapotranspiración que no puede hacerse productiva para propósitos agrícolas. Estas cantidades limitan seriamente la disponibilidad de agua verde y, por tanto, es vital que se tengan en cuenta; sin embargo, sin consenso sobre la cantidad de terreno (y su respectiva evapotranspiración) que debe estar reservada para la naturaleza y sobre cómo definir con precisión cuándo y dónde no es posible hacer la evapotranspiración productiva, es imposible hacer un análisis cuantitativo (Hoekstra et al, 2011).

1.4.3.1. Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.

La huella hídrica azul total en una zona de captación es igual a la suma de todas las huellas hídricas azules de proceso dentro de esta zona de captación. La huella hídrica azul en un período determinado y en una zona de captación determinada genera un punto crítico cuando excede la disponibilidad de agua azul. La disponibilidad de agua azul (DAazul) en una zona de captación x en un período determinado t se define como la esorrentía natural de la zona de captación (E_{nat}) menos el caudal mínimo ecológico (Hoekstra et al, 2011).

Cuando en un período y zona de captación determinados la huella hídrica azul sobrepasa la disponibilidad de agua azul, significa que se ha violado el caudal mínimo ecológico en ese período y en esa zona de captación. Es necesario formular el caudal mínimo ecológico en cuanto a la cantidad y la periodicidad de los flujos de agua necesarios para preservar los ecosistemas de agua dulce y estuarios y el modo de vida y bienestar de las personas que dependen de estos ecosistemas (Hoekstra et al, 2011).

El caudal mínimo ecológico se extrae de la esorrentía natural, no de la esorrentía real, ya que esta última ya ha sido afectada por el consumo de agua aguas arriba. Podemos estimar la esorrentía natural como la esorrentía real más la huella hídrica azul dentro de la zona de captación (Hoekstra et al, 2011).

La escasez de agua azul en una zona de captación x (EA_{azul}) se define como la relación entre el total de las huellas hídricas azules en la zona de captación ($\sum HH_{azul}$) y la disponibilidad de agua azul (Hoekstra et al, 2011).

Una escasez de agua azul del 100% significa que el agua azul disponible ha sido completamente consumida. Si la escasez de agua azul está por encima del 100%, es insostenible. La escasez de agua azul depende del tiempo; varía dentro de un mismo año y

de año a año. La medición se puede realizar diariamente, pero basta con hacerlo de manera mensual para observar la variación a lo largo del año (Hoekstra et al, 2011).

1.4.3.2. Caudal mínimo ecológico (CME).

El uso intensivo del agua en diferentes actividades humanas, muchas veces con intereses contrapuestos, puede producir externalidades ambientales negativas, como la sobreexplotación y agotamiento físico del recurso en el cauce natural, afectación y/o pérdida de ecosistemas fluviales. Esta realidad, junto con la valoración ecológica del agua como elemento del medio ambiente, cuya cantidad y calidad son básicas para la mantención de los ecosistemas fluviales, ha llevado a la necesidad de establecer un instrumento que permita mantener los ríos como base de estos ecosistemas y no solamente como fuente de un recurso renovable necesario para el hombre. El mismo término “caudal ecológico” es discutido; se han dado otras terminologías: caudal ambiental, caudal básico, caudal de compensación, caudal mínimo, etc. Se optó por el de caudal ecológico mínimo, como término aceptado y reconocido a nivel técnico y jurídico. Y de este término se han dado diferentes conceptos, algunos más simples y otros más complejos (Philipps, 2013).

1. El caudal ecológico se ha definido como el agua mínima necesaria para preservar los valores ecológicos en el cauce de ríos u otros cauces de aguas superficiales (Riestra, 2007).
2. “Caudal mínimo necesario para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido” (Riestra, 2007).
3. “Caudal que debe mantenerse en cada sector hidrográfico, de tal manera que los efectos abióticos (profundidad, velocidad de la corriente, turbulencia, calidad del agua, ancho mojado, etc.), producidos por la disminución de caudal no alteren significativamente la

dinámica del ecosistema, permitiendo mantener el objetivo ambiental según el estado de referencia que se aplique” (Riestra y Benavides, 2004).

En el artículo 3°, del decreto 14 del ministerio del medio ambiente (2013), se definen dos criterios diferentes para determinar el caudal mínimo ecológico:

- a) Para aquellos cauces donde se constituyeron derechos con un caudal ecológico mínimo, considerando como fórmula de cálculo el criterio del diez por ciento del caudal medio anual, se considerará el cincuenta por ciento del caudal de probabilidad de excedencia de noventa y cinco por ciento, para cada mes.
- b) Para aquellos cauces donde se constituyeron derechos con un caudal ecológico mínimo del menor al cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, se considerará como caudal ecológico mínimo el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, para cada mes.
- c) Para aquellos cauces donde no existen derechos con caudal ecológico mínimo, se aplicará, para los nuevos derechos, el criterio establecido en la letra b) con las mismas restricciones.

Además, en el artículo 6° del mismo decreto 14 del ministerio del medio ambiente se señala: El Ministerio de Obras Públicas, en casos calificados, mediante decreto supremo y previo informe favorable del Ministerio del Medio Ambiente, podrá fijar un caudal ecológico mínimo diferente al establecido en el artículo 3° de este reglamento, no pudiendo afectar derechos de aprovechamiento de aguas ya existentes.

El caudal ecológico mínimo que se fije en virtud de lo dispuesto en el presente título se establecerá para un cauce, para una sección o para un sector de aquel y no podrá superar el cuarenta por ciento del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial en dicho cauce, sección o sector.

1.4.4. Formulación de respuestas a la huella hídrica.

La formulación de respuesta a la huella hídrica, en la cuenca y periodo en estudio, dependerá de los resultados obtenidos.

En agricultura, la huella hídrica gris se puede reducir a cero evitando aplicar sustancias químicas al suelo. Se puede disminuir sustancialmente utilizando menos sustancias químicas, empleando mejores técnicas y mejorando los períodos de aplicación (para que lleguen menos sustancias químicas al sistema de agua mediante escorrentía del suelo o por lixiviación). Las huellas hídricas verde y azul (m^3/t) en agricultura pueden reducirse considerablemente con el incremento de la productividad de agua verde y azul (t/m^3). Por lo general la agricultura, se centra en maximizar la productividad del suelo (t/ha), que tiene sentido cuando el suelo es escaso y el agua dulce abundante; pero cuando el agua es más escasa que el suelo, es más importante maximizar la productividad del agua. En el caso del agua azul, esto implicaría aplicar menos agua de riego de una manera más inteligente para obtener un rendimiento mayor por metro cubico de agua evaporada (Hoekstra et al, 2011).

La reducción de la huella hídrica puede conseguirse de dos maneras diferentes. En una cadena de producción determinada se puede reemplazar una técnica con otra para que cause una huella hídrica menor o incluso igual a cero o se puede evitar el uso de un ingrediente determinado o la totalidad de un producto final (Hoekstra et al, 2011).

Desde un punto de vista global reducir la huella hídrica 1 m^3 en una zona de captación es equivalente a reducir el mismo volumen de huella hídrica en otra, aunque una de ellas muestre unos niveles de escasez o contaminación mucho mayores que la otra. La razón es que (dada las limitaciones de uso de agua potable a nivel mundial) cualquier reducción contribuye a la disminución de la demanda total de recursos. Cuando en determinadas zonas de captación se puedan producir más productos que necesiten abundante agua con el mismo volumen de agua, se puede reducir la producción de bienes que necesiten mucha agua en zonas de escasez y, de ese modo, la huella hídrica total en dichas áreas se puede reducir. Se trata de una forma indirecta, pero importante, de aliviar la presión sobre los recursos hídricos en zonas con escasez (Hoekstra et al, 2011).

Desde un punto de vista local y más inmediato, es importante saber si la reducción de 1 m^3 se produce en una zona de captación con abundancia o con escasez de agua. Reducir la huella hídrica en una zona con escasez contribuye a disminuir la presión, siempre y cuando la huella hídrica reducida por unidad de producción no quede anulada por el incremento de producción al mismo tiempo. Así que, aunque todas las reducciones de huella hídrica contribuyan a solucionar el problema global de recursos limitados de agua dulce, la prioridad debería ser la reducción de las huellas hídricas situadas en puntos críticos, porque la acción en estos tiene lógica global y local, mientras que la actuación fuera de dichos puntos solo tiene una lógica global (Hoekstra et al, 2011).

2. Pregunta de investigación y objetivos

2.1. Preguntas de investigación.

Pregunta 1: La cuenca del lago Lleu-Lleu tiene distintos períodos de consumo y de disponibilidad de agua, influenciados por la variabilidad climática, lo cual permite evaluar la sostenibilidad hídrica de la zona, mediante el cálculo de huella hídrica.

Pregunta 2: Asumiendo que la zona de estudio presenta un índice de sequía entre los intervalos de moderado a alto (ENCCRV,2017), que el estrés del agua físico es a menudo un fenómeno estacional más que anual y que las plantaciones forestales consumen una mayor cantidad de agua que el bosque nativo existirán períodos (meses) de insostenibilidad hídrica (puntos críticos) dentro del período en evaluación (año 2019).

2.2. Objetivos.

Objetivo General: Cuantificar la huella hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu durante todo un ciclo hidrológico (año 2019) y evaluar si dicha huella provoca períodos de insostenibilidad hídrica, a través de la valoración del indicador de huella hídrica azul.

Objetivos específicos:

- 1) Caracterizar la variabilidad climática y la huella hídrica, con sus componentes verde y azul, de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

- 2) Determinar la huella hídrica de las plantaciones forestales y de la vegetación nativa de la cuenca del lago Lleu-Lleu, con la finalidad de identificar el tipo de vegetación que mayor consumo de agua presenta.

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio.

La cuenca del lago Lleu-Lleu se ubica en la zona centro-sur de Chile, al sur-oeste de la Región del Biobío, en la provincia de Arauco, en la cordillera de Nahuelbuta, entre los 38°02' y 38°18' S, entre los 73°07' y 73°26' O, en el huso 18. Su superficie representa el 1,6% de la región del Biobío. Su tributario principal es el Río Huillinco y su principal cauce de salida es el Río Lleu-Lleu. (Parra *et al.*, 2003)

Tabla 3.1.1. Parámetros geomorfológicos de la cuenca y del lago Lleu-Lleu.

Parámetros Geomorfológicos Cuenca	Valores
Área(ha)	61.712,105
Perímetro(Km)	114,839
Pendiente Promedio(%)	12,9%
Densidad de drenaje(Km/Km ²)	0,56
Índice de compacidad de Gravellius	1,3
Altura Promedio (m.s.n.m)	387
Parámetros geomorfológicos lago	Valores
Área(ha)	6.298
Perímetro (Km)	93,3
Volumen (Km ³)	0,934.
Altura Promedio (m.s.n.m)	20

Tabla 3.1.2. Usos de suelo de la cuenca del Lago Lleu-Lleu.

Uso de suelo	Área(ha)	Porcentaje de la cuenca(%)
<i>Eucaliptus Glóbulus</i>	18.013,614	29,19
<i>Pinus Radiata</i>	13.923,362	22,56
Bosque Nativo	10.003,89	16,21
Matorrales	10.788,66	17,48
Lago Lleu-Lleu	6.298,951	10,21
Terrenos de uso agrícola	2.683,6	4,35

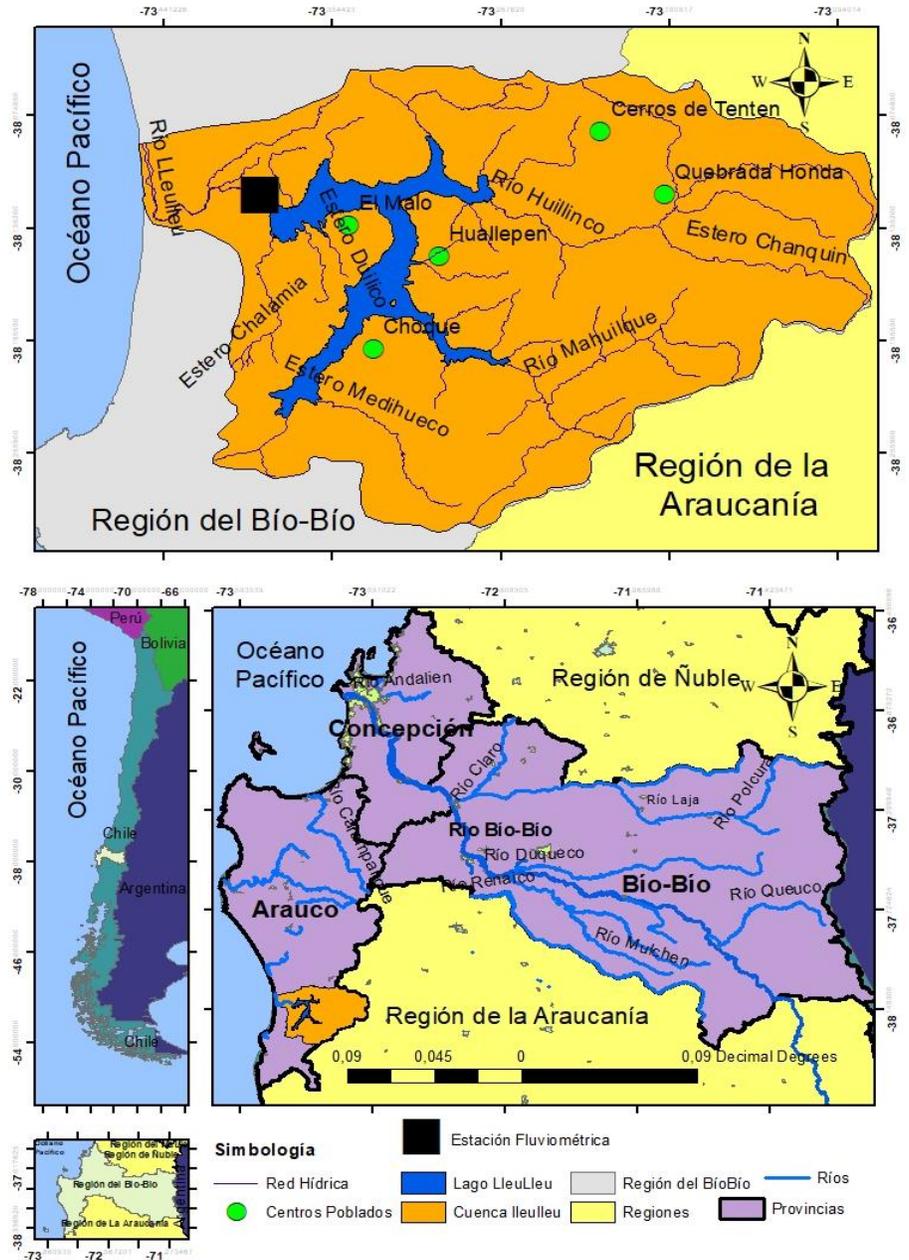


Figura 3.1.1. Localización Geográfica de la cuenca del lago Llu-Lleu (Elaboración propia).

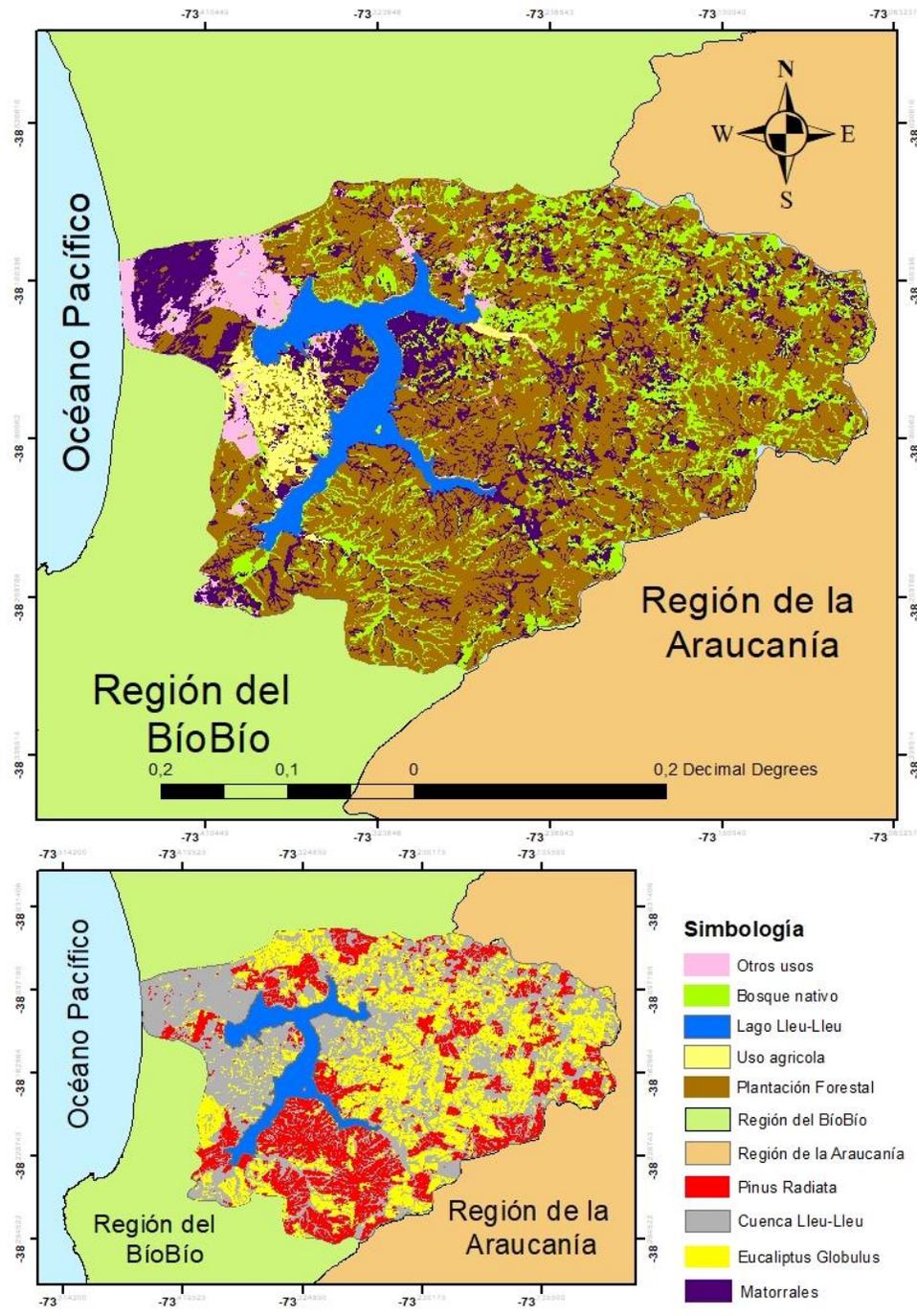


Figura 3.1.2. Uso de suelo cuenca Lleu-Lleu (CONAF 2015).

3.2. Determinación de la Variabilidad Climática.

3.2.1. Temperatura y Precipitación.

Los datos climáticos de temperatura y precipitación se encuentran disponibles en la página web del centro de estudios de resiliencia de Chile (CR2), “www.cr2.cl”.

Los datos de temperatura y precipitación del CR2 se encuentran en formato NetCDF, el NetCDF (formulario de datos comunes en red) es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la precipitación. Cada una de estas variables se puede mostrar mediante una dimensión (por ejemplo, tiempo) en ArcGis creando una vista de tabla o de capa a partir del archivo NetCDF (¿Qué son los datos NetCDF? —ArcGis Pro | Documentación, s. f.)

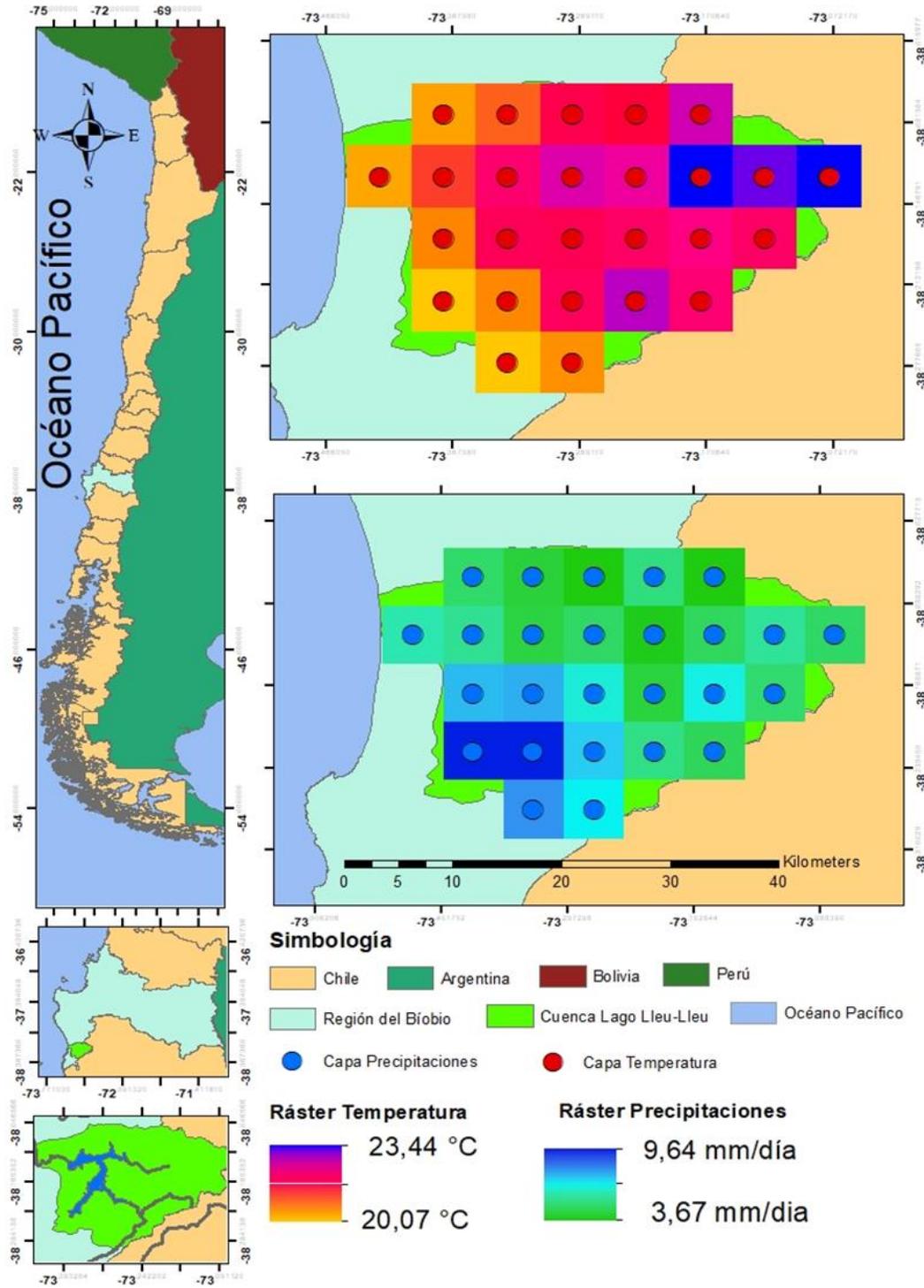


Figura 3.2.1. Capas ráster de precipitaciones y temperaturas de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (CR2).

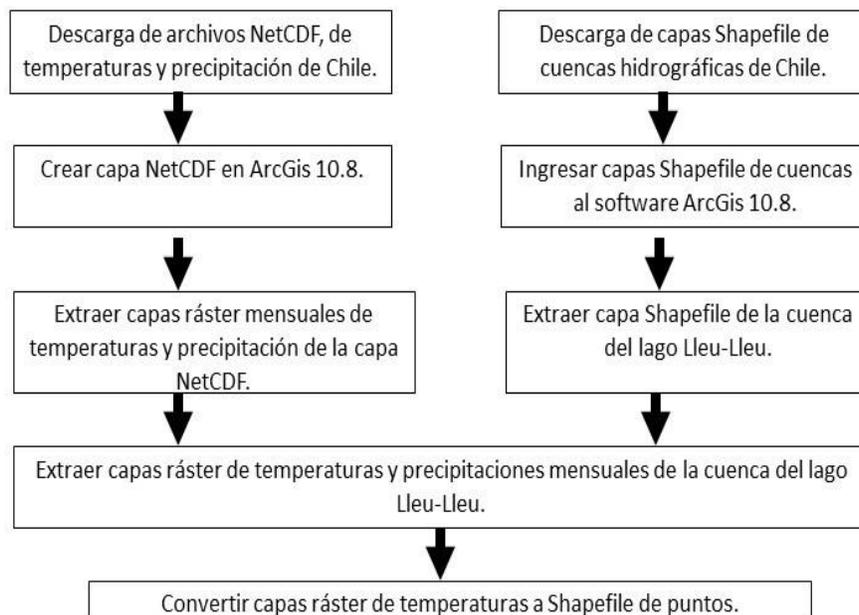


Figura 3.2.2. Obtención de datos mensuales de temperaturas y precipitaciones (elaboración propia).

3.2.2. Evapotranspiración de referencia (ET_o).

La ET_o se obtuvo de la página web “Climateengine.org” (formato ráster), con valores mensuales promedio

La ET_o descargada fue generada con el método de Penman-monteith, a través de la siguiente ecuación:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34u_2)} \quad (1).$$

Donde:

ET_o= Evapotranspiración de referencia (mm/día); R_n= Radiación neta en la superficie de cultivo (MJ*m⁻²*día⁻¹); G= Flujo de calor del suelo (MJ*m⁻²*día⁻¹); T= Temperatura media del aire a 2 metros de altura (°C); u₂= Velocidad del viento medido a 2 metros de altura (m*s⁻¹)

¹); e_s = Presión del vapor de saturación (kPa); e_a = Presión real del vapor (kPa); Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); γ = Constante psicométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). (FAO,1972).

Posterior a la descarga de la ETo, se procedió a recortar la capa ráster con el Shapefile de la cuenca del lago Lleu-Lleu, para finalmente convertir la capa ráster a un Shapefile de puntos, con la finalidad de promediar los valores obtenidos y obtener datos únicos mensuales.

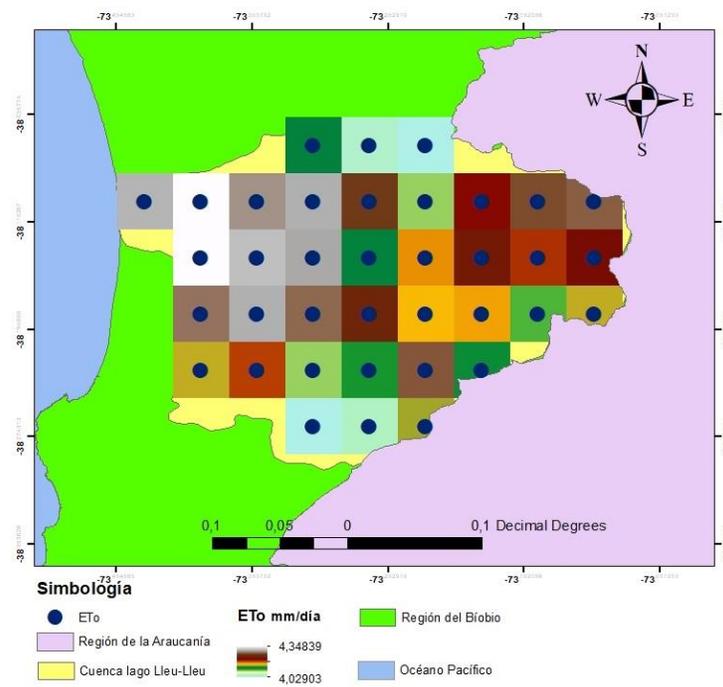


Figura 3.2.2.1 Evapotranspiración de referencia (ETo) de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (Climateengine.org).

3.3. Estimación de la huella hídrica total (HH) de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

Para el cálculo de la huella hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu, se empleó la metodología propuesta por Hoekstra *et al*, (2011). En el caso de este estudio no se calculó la huella hídrica gris por falta de información sobre la fertilización y/o aplicación de herbicidas selectivos y no selectivos sobre las plantaciones forestales.

$$HH = ETc * \text{Á} \quad (2)$$

Dónde: HH = Huella Hídrica del cultivo; ETc = Evapotranspiración real del cultivo; Á = superficie de la cuenca cubierta por vegetación(m²).

3.3.1. Identificación de la superficie de la cuenca cubierta por vegetación.

Entre el año 2015 (año de publicación de los usos de suelo) y el año 2019 (año en evaluación), es probable que el suelo cubierto por vegetación haya sufrido cambios debido a diferentes factores, tales como cosechas y siembras de plantaciones forestales, incendios forestales, tala y crecimiento de bosque nativo, además las especies de *Pinus Radiata* y *Eucaliptus Glóbulus* están catalogadas como invasoras (Becerra,2016), los cultivos agrícolas son de temporada (generalmente verano) y ciertas superficies son inundadas en los meses más lluviosos.

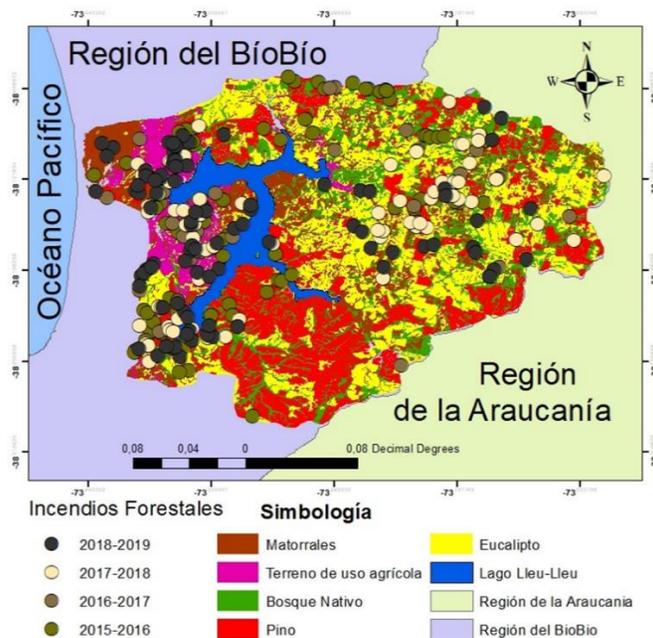


Figura 3.3.1.1. Incendios forestales en la cuenca del lago Lleu-Lleu, período 2015-2019 (CONAF).

Entre 2015 y 2018 los incendios forestales consumieron 5166,1 ha en la cuenca del lago Lleu-Lleu (CONAF).

Se hizo necesario evaluar de forma mensual los suelos cubiertos por vegetación y los suelos desnudos, ya que estos últimos no participan en el proceso evapotranspirativo.

La cobertura vegetal fue uno de los primeros focos de la investigación de la evaluación y manejo de recursos naturales, usando imágenes de satélite, especialmente a partir del lanzamiento de la serie LANDSAT en 1972 (CIREN, 2013). La ausencia y presencia de cobertura vegetal fue determinada a través del índice de vegetación diferencial normalizado. Un Índice de Vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert et al, 1997).

El NDVI, es el más conocido de todos, y es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. (CIREN, 2013)

$NDVI < 0.1$: corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas. (CIREN, 2013)

$0.2 \leq NDVI \leq 0.3$: pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales. (CIREN, 2013)

A partir de estos valores tendremos los niveles correspondientes a praderas, cultivos, forestaciones etc. dependiendo del valor alcanzado. (CIREN, 2013).

Las bandas espectrales (formato ráster), necesarias para el cálculo de NDVI mensual, para la cuenca del lago Lleu-Lleu, fueron descargadas desde la NASA y procesadas con el software Arcgis 10.8.

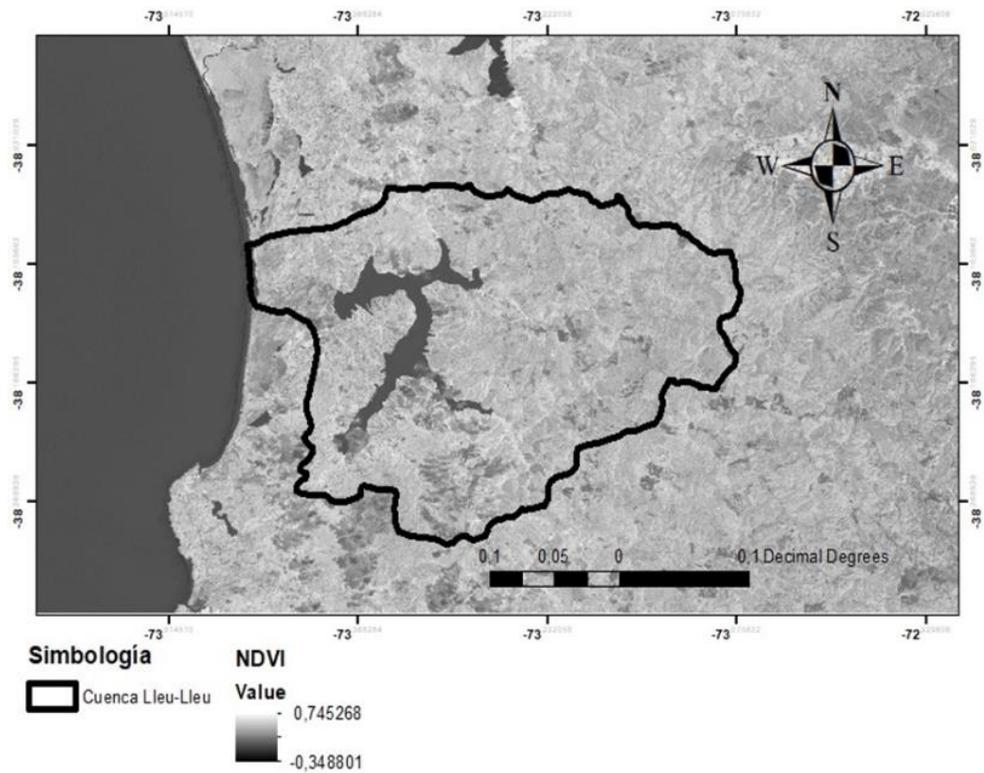


Figura 3.3.1.2. índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) de la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019, (earthexplorer.gov.com).

Posterior a la generación de capas ráster de valores de NDVI mensual para la cuenca del lago Lleu-Lleu, se procedió a convertir estas capas ráster a shapefile de puntos, para posteriormente extraer los valores de $NDVI < 0.2$, con la finalidad de identificar los suelos con ausencia de cobertura vegetal.

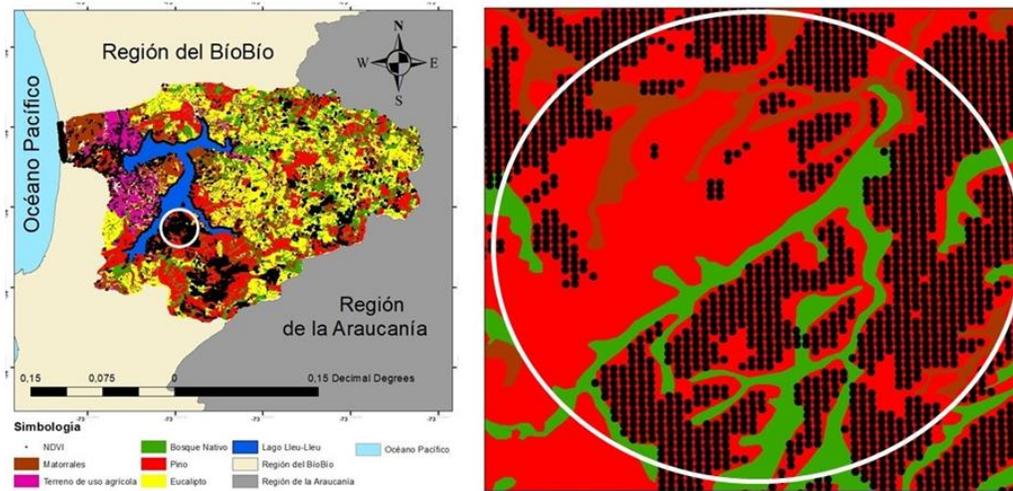


Figura 3.3.1.3. Valores de NDVI menores a 0.2 de la cuenca del lago Llanquihue, enero 2019 (elaboración propia).

3.3.2. Evapotranspiración del cultivo (ETc).

La ETc(mm/día) se calculó mediante la fórmula propuesta por Hoekstra *et al.*, (2011).

$$ETc \text{ (mm/día).} = ETo \text{ (mm/día).} \times Kc \text{ (3)}$$

Dónde: Kc = coeficiente de cultivo; ETo= Evapotranspiración de referencia.

La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ETo). La relación ETc/ETo que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo (Kc), y se utiliza para relacionar ETc a ETo de manera que $ETc = Kc \times ETo$. (FAO,1972)

3.3.3. Factor Kc de los cultivos.

Desde la página web del ministerio de agricultura de Chile, agrisatwebgis.com, se descargaron 13.268 puntos de Kc mensual, para todo el período en evaluación, en un buffer de 5 km alrededor de la cuenca del lago Lleu-Lleu. Todo esto con la finalidad de aplicar la interpolación “Kriging” e “IDW”, en el software ArcGis 10.8, para obtener valores únicos mensuales de Kc, para toda la cuenca.

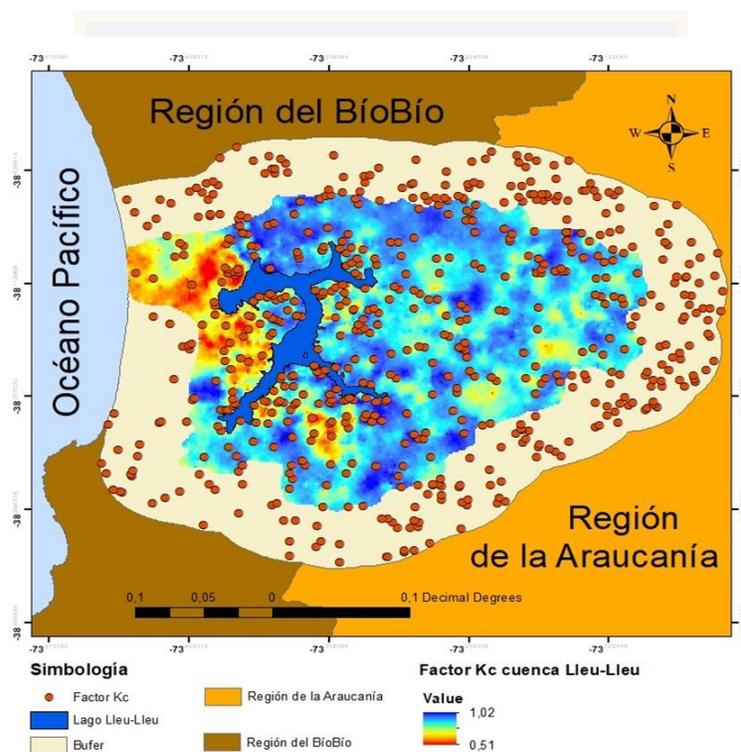


Figura 3.3.3.1 Valores de Kc puntuales de los suelos cubiertos por vegetación en la cuenca del lago Lleu-Lleu, enero 2019 (Elaboración propia).

Previo al cálculo de los valores de Kc, se procedió a identificar de manera mensual la superficie cubierta por vegetación, ya que las capas de uso de suelo fueron generadas por CONAF, en el año 2015 y el año de estudio de este informe es del 2019. Los tipos y

densidades de vegetación influyen en los patrones de evapotranspiración. Una superficie de tierra con vegetación tiene una tasa más alta de evapotranspiración (y, por lo tanto, menos agua disponible para recarga) que una superficie sin vegetación en condiciones similares (Montoya, 2017).

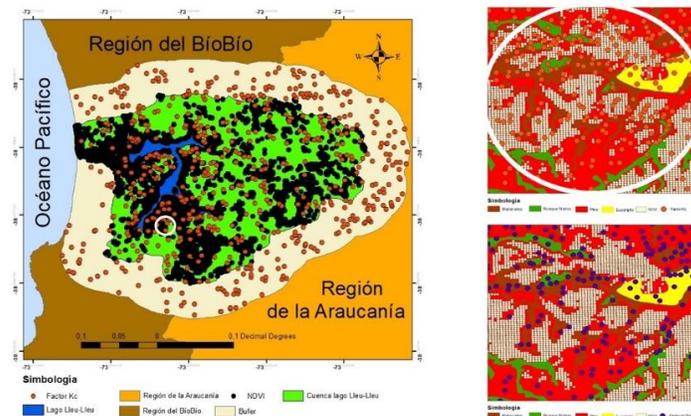


Figura 3.3.3.2. Valores de NDVI menores a 0.2, valores de Kc superpuestos a valores de NDVI menor a 0.2 y valores de Kc borrados de la cuenca del lago Llanquihue, enero 2019 (elaboración propia).

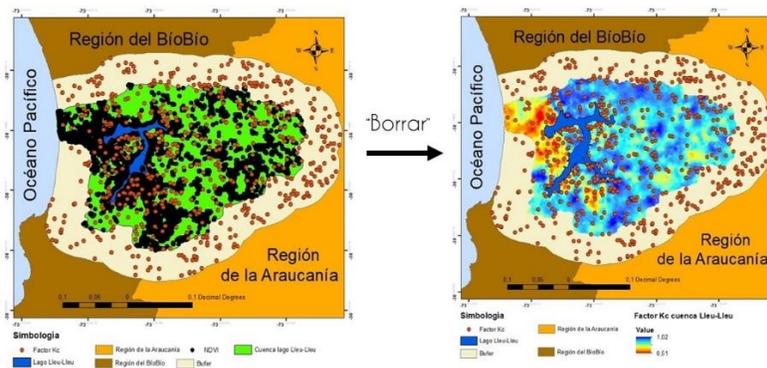


Figura 3.3.3.3. Valores de NDVI menor a 0.2 y Valores de Kc de los suelos cubiertos por vegetación en la cuenca del lago Llanquihue, enero 2019 (Elaboración propia).

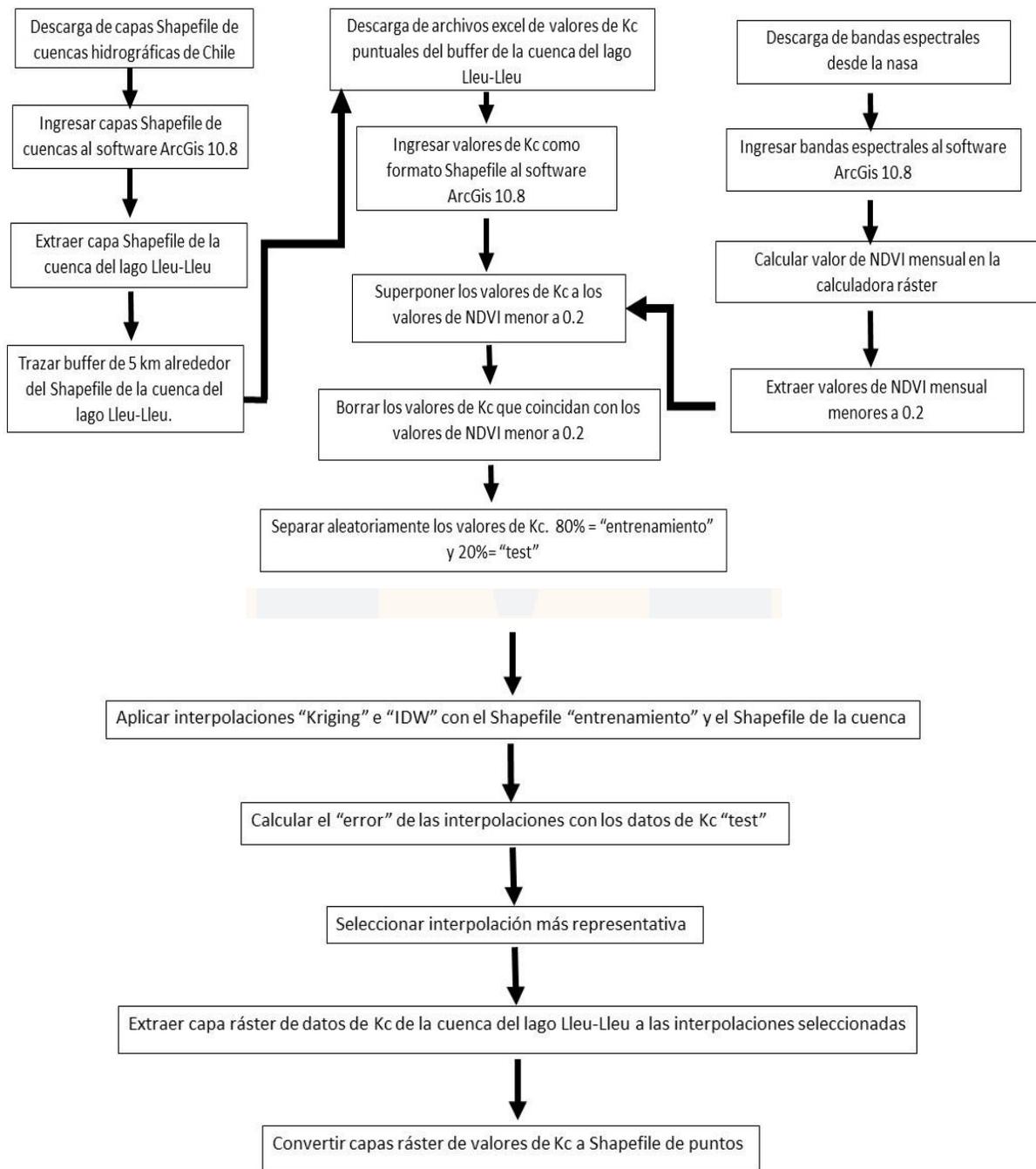


Figura 3.3.3.4. Metodología para la obtención de los valores de Kc mensual de los suelos cubiertos por vegetación en la cuenca del lago Lleu-Lleu (elaboración propia).

El criterio para dilucidar cuál interpolación fue la más representativa para cada mes, es el menor valor absoluto del promedio de la columna “error” de la tabla de atributos de los Shapefile de puntos que arroja cada validación (Mastergis, 2022). El valor de los “Errores” que arrojó cada validación se encuentran expresados en el anexo 7.1.

Los valores de Kc mensual para el *Eucalyptus Glóbulus*, *Pinus Radiata*, Matorrales y Bosque Nativo, se extrajeron desde los valores de Kc generados en la figura 3.3.3.4, con las capas Shapefile obtenidas desde la CONAF.

3.3.4. Huella hídrica verde y huella hídrica azul de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

La evapotranspiración de agua verde (ET verde), proveniente de las precipitaciones, se calcula como el mínimo entre la evapotranspiración total de un cultivo (ETc) y la precipitación efectiva (Peffec). Cuando la precipitación efectiva es mayor que la evapotranspiración total del cultivo, la ET azul (aguas superficiales y subterráneas) es igual a cero (Hoekstra et al, 2011).

$$ET \text{ verde} = \min (ETc, Peffec) [\text{volumen/tiempo}] \quad (4).$$

$$ET \text{ azul} = \max (0, ETc-Peffec) [\text{Volumen/tiempo}] \quad (5).$$

La precipitación efectiva (Peffec) es parte de la cantidad total de precipitación que es retenida por el suelo para que este potencialmente disponible para cumplir la necesidad hídrica del cultivo. (Hoekstra et al., 2011).

Para calcular la ET verde se ocupó el software de la FAO CROPWAT 8.0. Para ello se ingresaron los datos mensuales de precipitación y se seleccionó el método de precipitación confiable (FAO/AGLW). Esta es una fórmula empírica que desarrolló el Servicio de Aguas de la FAO para estimar la precipitación confiable y las pérdidas estimadas debido a la Escorrentía Superficial (Es) y a la Percolación Profunda. Una vez ingresados los datos de precipitación mensual, el programa arrojó los resultados de precipitación efectiva (Peffec).

Para los meses en donde la Peffec es mayor a la ETc, la ET verde es igual a la ETc. Para los meses en donde la Peffec es menor a la ETc la ET verde= Peffec. Para los meses en donde la Peffec es menor a la ETc se procedió a estimar la ET azul, mediante la fórmula:

$$ET\ azul = ETc - ET\ verde \quad (6).$$

Para determinar la Huella hídrica verde (HH verde) y la huella hídrica azul (HH azul), de la cuenca del lago Lleu-Lleu, de forma mensual, se utilizaron las siguientes expresiones:

$$HH\ verde = ET\ verde * \dot{A} \quad (7).$$

$$HH\ azul = ET\ azul * \dot{A} \quad (8).$$

3.4. Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.

La huella hídrica azul en un período determinado y en una zona de captación determinada genera un punto crítico cuando excede la disponibilidad de agua azul. La disponibilidad de agua azul (DA_{azul}) en una zona de captación x en un período determinado t se define como la escorrentía natural de la zona de captación (E_{nat}) menos el caudal mínimo ecológico (Hoekstra et al, 2011).

$$DA_{\text{azul}} = E_{\text{nat}} - CME \text{ [volumen/tiempo]} \quad (9)$$

$$E_{\text{nat}} = E_t + HH_{\text{azul}} \text{ [volumen/tiempo]} \quad (10)$$

Dónde: E_t = Escorrentía o Caudal total de salida; E_{nat} = escorrentía natural; CME: caudal mínimo ecológico.

Los datos de caudal de salida de la cuenca (E_t) fueron descargados de la estación fluviométrica “Río Lleu-Lleu en desagüe lago Lleu-Lleu”, del sitio web de la DGA “<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>”, (MOP - Chile, s. f.).

Con datos de caudal disponibles del punto de desagüe de una cuenca, para un período de 25 años de manera ideal, se puede estimar el valor del caudal mínimo ecológico, con la metodología propuesta por el ministerio de medio ambiente (MMA), en el decreto 14, letra b:

- i. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es menor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el cincuenta por ciento del caudal con probabilidad de excedencia del noventa y cinco por ciento.
- ii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor al veinte por ciento del caudal medio

anual, el caudal ecológico mínimo, en esos meses, será el veinte por ciento del caudal medio anual.

La escasez de agua azul en una zona de captación x (EA azul) se define como la relación entre el total de las huellas hídricas azules en la zona de captación ($\sum HH$ azul) y la disponibilidad de agua azul (DA azul):

$$EA \text{ azul} = \frac{\sum HH_{\text{azul}}}{DA_{\text{azul}}} * 100 \quad (11)$$

Una escasez de agua azul del 100% significa que el agua azul disponible ha sido completamente consumida. Si la escasez de agua azul está por encima del 100%, es insostenible. (Hoekstra et al., 2011).

4. Resultados

4.1 Variabilidad Climática.

Tabla 4.1.1 Variabilidad Climática de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

Meses	Precipitación promedio(mm/día)	Evapotranspiración de referencia (mm/día)	Temperatura promedio (°C)
enero	0,57	4,63	15,24
febrero	0,14	4,10	17,02
marzo	1,07	3,04	14,21
abril	0,85	1,85	12,42
mayo	5,97	1,02	10,88
junio	9,23	0,84	9,12
julio	8,06	0,96	8,51
agosto	3,26	1,17	8,95
septiembre	2,23	1,85	9,60
octubre	2,25	2,55	11,13
noviembre	0,91	3,45	13,80
diciembre	0,20	4,20	14,71

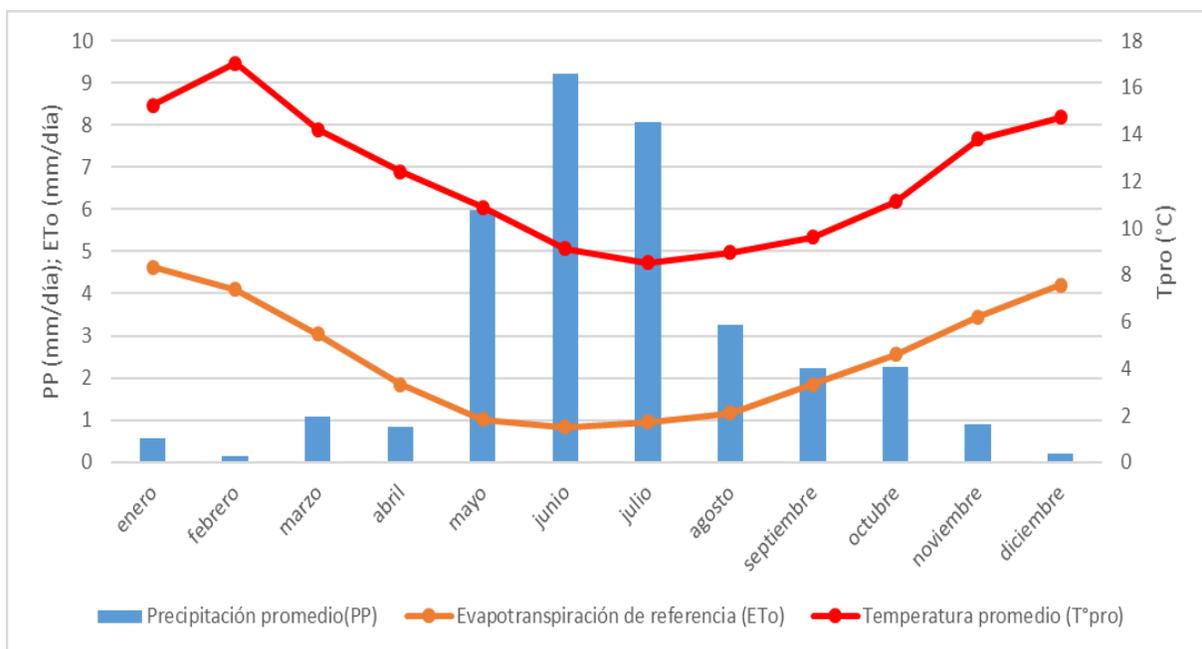


Figura 4.1.1 Climograma de la cuenca del lago Lleu-Lleu, año 2019.

4.2 Huella hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu

Tabla 4.2.1 Superficie cubierta por vegetación evaluada de forma mensual, en la cuenca del lago Lleu-Lleu

mes	Superficie sin vegetación (ha)	Superficie con vegetación(ha)
enero	2351,97	55460,60
febrero	4403,07	53409,50
marzo	8000,03	49812,54
abril	11000,57	46812,00
mayo	14025,51	43787,06
junio	12930,38	44882,19
julio	11835,45	45977,12
agosto	10740,02	47072,55
septiembre	9642,42	48170,15
octubre	2708,01	55104,56
noviembre	3960,81	53851,76
diciembre	3557,97	54254,60

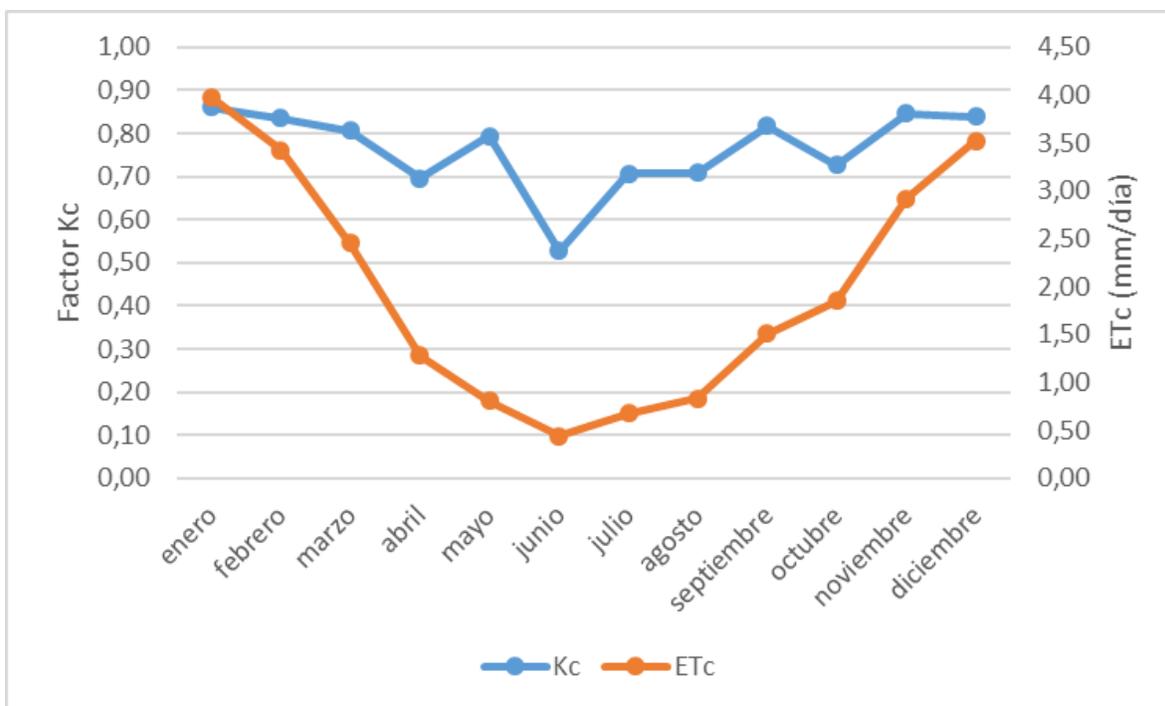


Figura 4.2.1 Factor Kc de los cultivos y Evapotranspiración de los cultivos (ETc), de la cuenca del lago Lleu-Lleu

Tabla 4.2.2 Factor de cultivo Kc, Evapotranspiración diaria de los cultivos (ETc) y Huella Hídrica mensual (HH) de la cuenca del lago Lleu-Lleu, año 2019.

mes	Kc	ETc(mm/día)	HH (m3/mes)
enero	0,86	3,98	68.400.527,71
febrero	0,84	3,43	51.262.126,4
marzo	0,81	2,45	37.846.732,95
abril	0,70	1,29	18.048.293,6
mayo	0,79	0,81	10.984.953,07
junio	0,53	0,44	5.957.248,256
julio	0,71	0,68	9.687.838,943
agosto	0,71	0,83	12.105.221,11
septiembre	0,82	1,51	21.799.806,23
octubre	0,73	1,85	31.665.671,99
noviembre	0,85	2,92	47.190.390,55
diciembre	0,84	3,52	59.256.218,07

Tabla 4.2.3 Precipitación efectiva (Peffec), Evapotranspiración verde (ET verde) y Evapotranspiración azul (ET azul) de la cuenca del lago Lleu-Lleu

mes	Peffec(mm/día)	ET verde (mm/día)	ET azul(mm/día)
enero	0,02	0,02	3,96
febrero	0,00	0,00	3,43
marzo	0,32	0,32	2,13
abril	0,18	0,18	1,11
mayo	4,00	0,81	0,00
junio	6,58	0,44	0,00
julio	5,67	0,68	0,00
agosto	1,83	0,83	0,00
septiembre	1,00	1,00	0,51
octubre	1,03	1,03	0,83
noviembre	0,21	0,21	2,71
diciembre	0,00	0,00	3,52

Tabla 4.2.4 Huella hídrica verde (HH verde) y huella hídrica azul (HH azul) de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

mes	HH verde (m3/mes)	HH azul(m3/mes)
enero	332.484,63	68.068.043,08
febrero	0,00	51.262.126,40
marzo	5.485.996,40	32.360.736,56
abril	2.992.361,67	15.055.931,93
mayo	10.984.953,07	0,00
junio	5.957.248,26	0,00
julio	9.687.838,94	0,00
agosto	12.105.221,11	0,00
septiembre	16.679.645,61	5.120.160,62
octubre	17.621.685,39	14.043.986,60
noviembre	3.546.502,72	43.643.887,83
diciembre	0,00	59.256.218,07

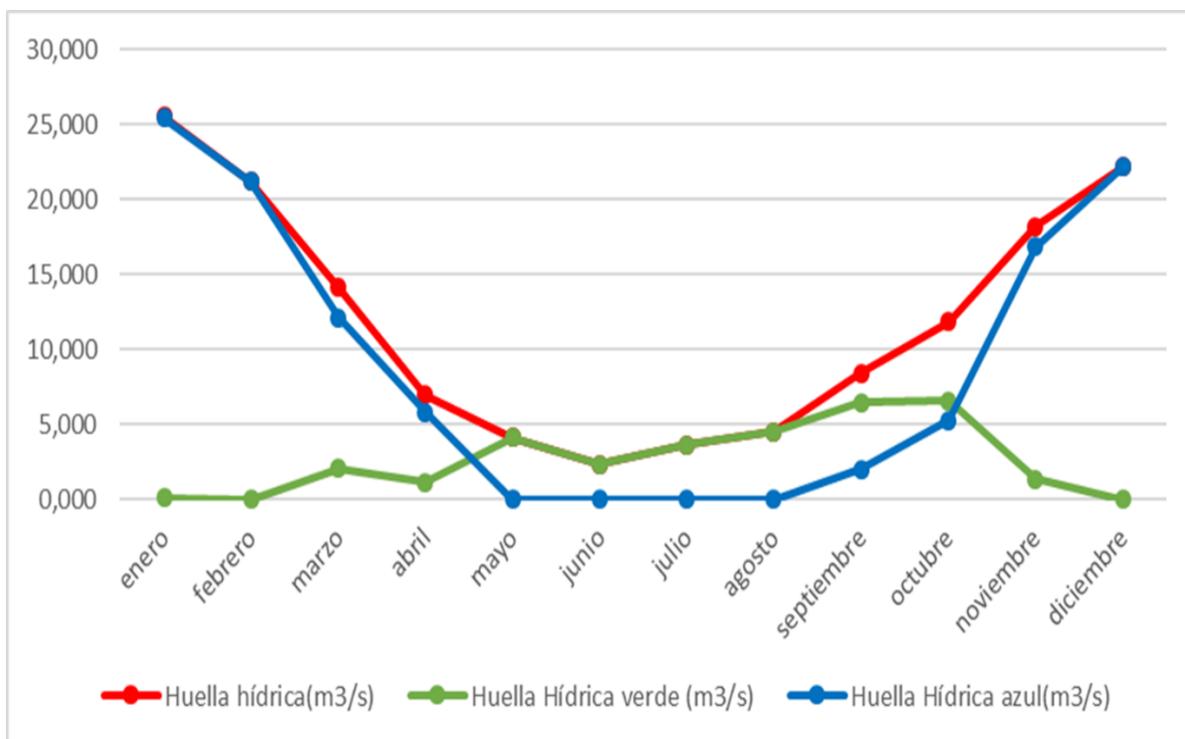


Figura 4.2.2 Huella hídrica total, huella hídrica verde y huella hídrica azul de la cuenca del lago Llu-Llu

4.3 Huella hídrica de los cultivos, de la cuenca del lago Llu-Llu.

Tabla 4.3.1 Factor Kc de los cultivos de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Llu-Llu

mes	Kc Eucalipto	Kc Pino	Kc Bosque Nativo	Kc Matorrales
enero	0,940	0,884	0,858	0,870
febrero	0,904	0,856	0,832	0,847
marzo	0,897	0,841	0,846	0,852
abril	0,769	0,722	0,743	0,749
mayo	0,816	0,794	0,771	0,828
junio	0,680	0,604	0,629	0,621
julio	0,752	0,738	0,758	0,770
agosto	0,751	0,724	0,749	0,746
septiembre	0,846	0,822	0,817	0,829
octubre	0,775	0,754	0,703	0,731
noviembre	0,913	0,885	0,817	0,842
diciembre	0,917	0,873	0,819	0,837

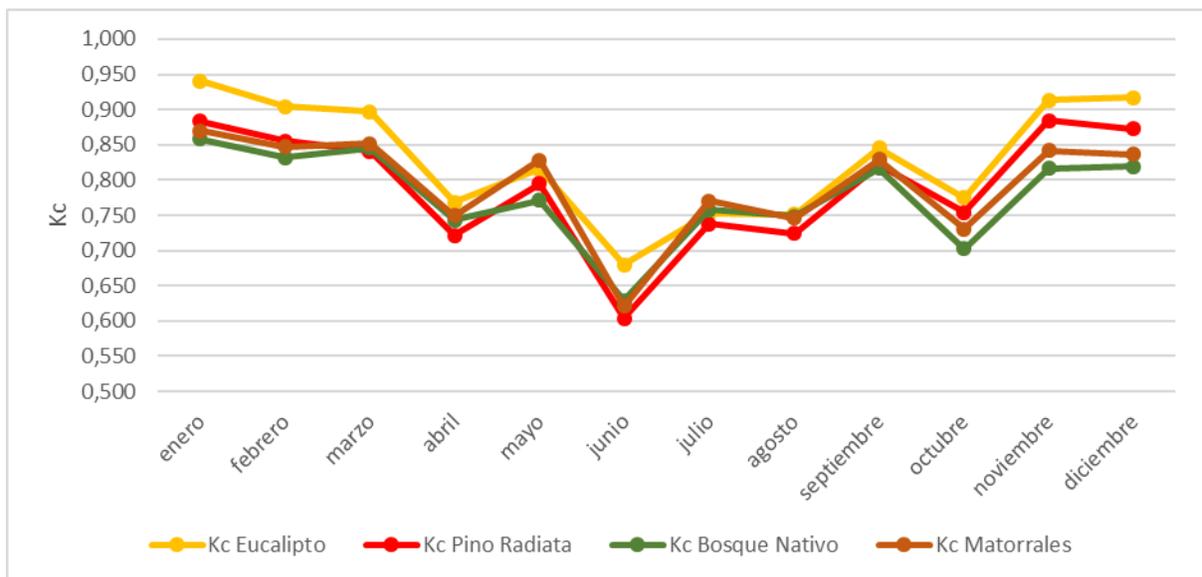


Figura 4.3.1 Factor Kc mensual de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu

Tabla 4.3.2 Evapotranspiración real (ETc) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu

Meses	ETc Eucalipto	ETc Pino	ETc Bosque Nativo	ETc Matorrales
enero	4,35	4,09	3,97	4,03
febrero	3,71	3,51	3,41	3,47
marzo	2,73	2,56	2,57	2,59
abril	1,42	1,34	1,37	1,39
mayo	0,83	0,81	0,79	0,84
junio	0,57	0,51	0,53	0,52
julio	0,72	0,71	0,73	0,74
agosto	0,88	0,85	0,88	0,87
septiembre	1,56	1,52	1,51	1,53
octubre	1,98	1,92	1,79	1,86
noviembre	3,15	3,05	2,82	2,91
diciembre	3,85	3,66	3,44	3,51

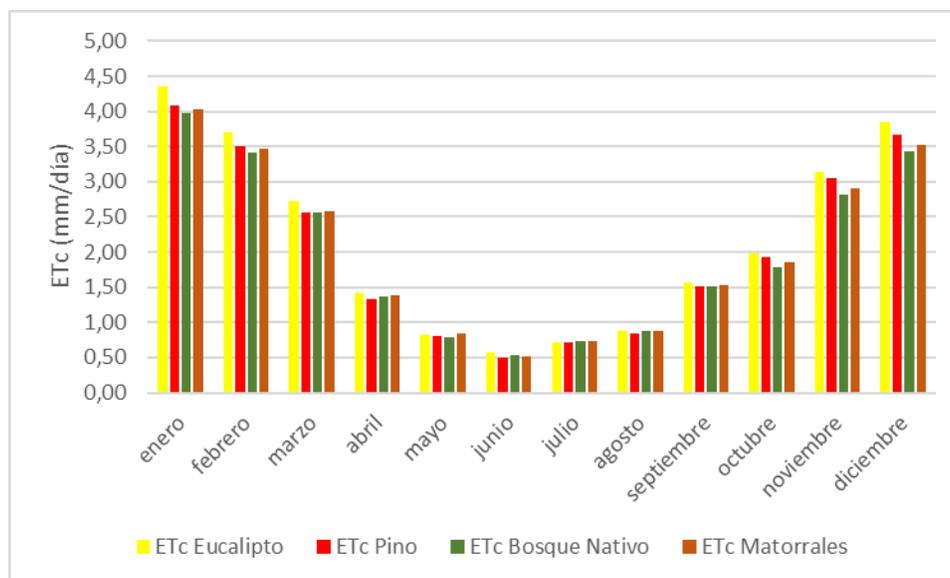


Figura 4.3.2 Evapotranspiración real (ETc) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu

Tabla 4.3.3 Área (ha) cubierta por vegetación, de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu

Meses	Eucalipto	Pino	Bosque nativo	Matorrales
enero	15.493,33	13.388,41	10.646,58	10.697,02
febrero	11.703,90	12.287,80	12.287,80	10.183,48
marzo	11.695,29	12.919,31	10.690,19	8.559,74
abril	11.039,91	10.171,75	9.251,86	8.285,68
mayo	13.034,45	10.408,78	10.408,78	8.431,45
junio	10.841,08	9.617,37	8.235,47	7.124,23
julio	12.199,09	9.366,47	8.117,33	7.448,43
agosto	12.359,49	9.137,32	8.054,50	7.939,12
septiembre	15.179,10	10.490,88	9.604,74	8.925,56
octubre	15.635,63	12.045,26	12.344,30	10.662,73
noviembre	14.426,04	13.289,50	12.106,19	9.608,10
diciembre	15.427,65	12.469,60	10.593,86	9.501,60

Tabla 4.3.4 Huella hídrica(m³/mes) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

Meses	HH Eucalipto	HH Pino	HH Bosque Nativo	HH Matorrales
enero	20.910.505,41	16.979.342,43	13.112.705,46	13.354.199,31
febrero	12.147.247,48	12.073.151,76	11.739.380,46	9.901.241,82
marzo	9.883.283,84	10.237.541,26	8.518.399,92	6.869.453,86
abril	4.709.057,80	4.073.838,24	3.814.445,58	3.444.852,68
mayo	3.363.351,57	2.614.777,15	2.537.386,58	2.208.115,79
junio	1.856.998,30	1.462.633,75	1.306.070,63	1.115.519,46
julio	2.730.254,60	2.056.014,89	18.30.054,69	1.707.622,75
agosto	3.367.537,04	2.400.576,85	2.187.982,62	2.148.191,93
septiembre	7.126.385,99	4.783.300,93	4.354.188,22	4.108.874,09
octubre	9.580.805,11	7.177.118,24	6.856.607,51	6.158.136,45
noviembre	13.631.971,93	12167055,92	10.230.847,10	8.376.293,49
diciembre	18.420.220,12	14.166.000,06	11.295.651,95	10.349.882,58

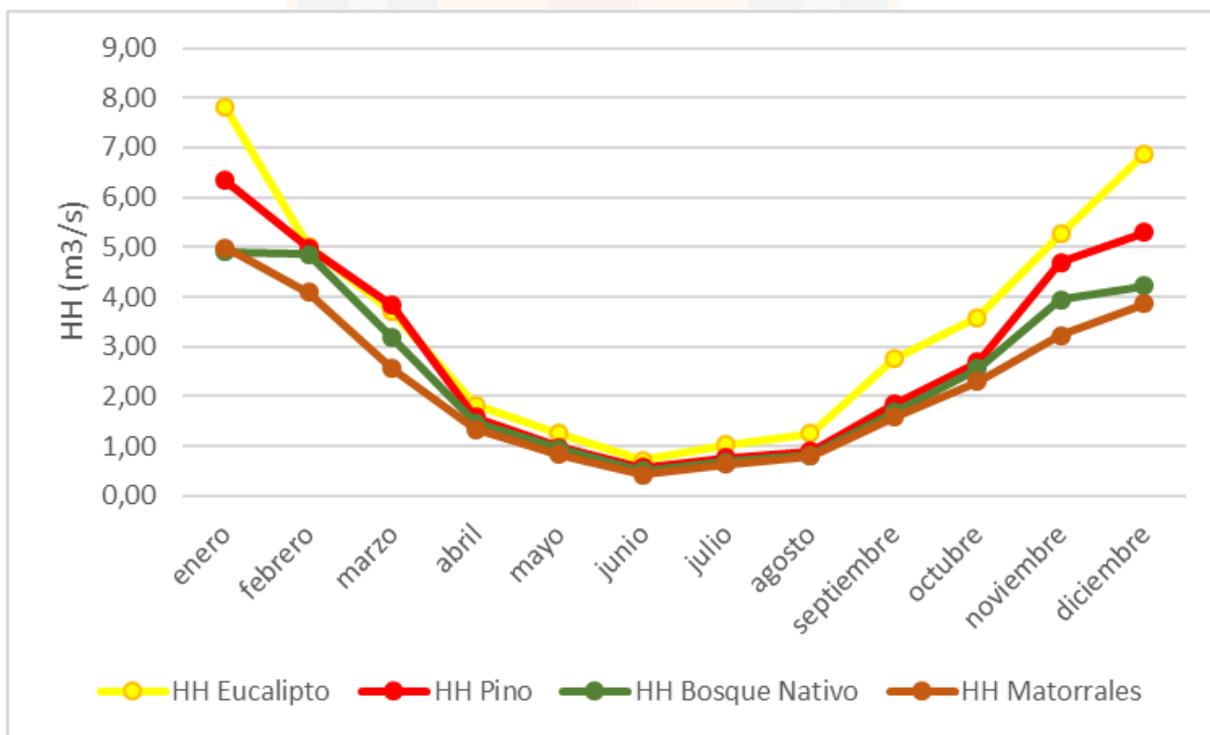


Figura 4.3.3. Huella hídrica (HH) de los diferentes usos de suelo de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

4.4. Análisis de sostenibilidad.

Tabla 4.4.1 Escorrentía total (Et) y escorrentía natural (Enat), de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

mes	Et (m3/mes)	Enat (m3/mes)
enero	19.043.424	87.111.467,08
febrero	16.111.872	67.373.998,4
marzo	18.722.016	51.082.752,56
abril	13.245.120	28.301.051,93
mayo	17.650.656	17.650.656
junio	39.709.440	39.709.440
julio	128.482.848	128.482.848
agosto	127.277.568	127.277.568
septiembre	63.089.280	68.209.440,62
octubre	38.729.664	52.773.650,6
noviembre	25.920.000	69.563.887,83
diciembre	16.632.864	75.889.082,07

Tabla 4.4.2. Caudal mínimo ecológico (CME), disponibilidad de agua azul (DA azul) y escasez de agua azul (EA azul) de la cuenca del lago Lleu-Lleu.

mes	CME (m3/mes)	DA azul (m3/mes)	EA azul (%)
enero	4.606.848,00	82.504.619,08	82,50
febrero	4.161.024,00	63.212.974,40	81,09
marzo	3.481.920,00	47.600.832,56	67,98
abril	4.821.120,00	23.479.931,93	64,12
mayo	5.784.004,60	11.866.651,40	0,00
junio	8.565.696,00	31.143.744,00	0,00
julio	8.851.219,20	119.631.628,80	0,00
agosto	8.851.219,20	118.426.348,80	0,00
septiembre	8.565.696,00	59.643.744,62	8,58
octubre	8.851.219,20	43.922.431,40	31,97
noviembre	7.750.080,00	61.813.807,83	70,61
diciembre	8.851.219,20	67.037.862,87	88,39

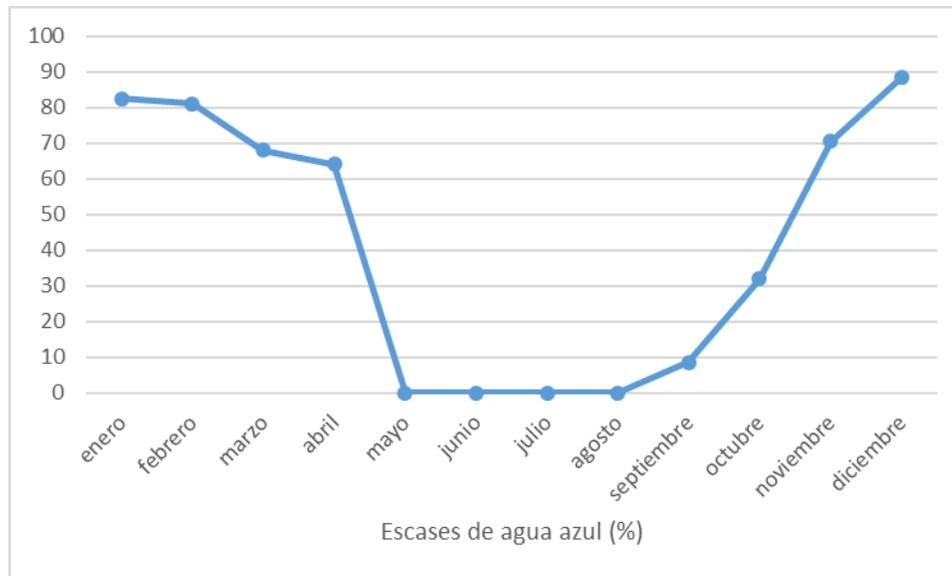


Figura 4.3.4. Escasez de agua azul (EA azul), de la cuenca del lago LLeu-Lleu (2019).

5. Discusión

5.1. Variabilidad Climática.

Para la cuenca del lago LLeu-Lleu, los meses más calurosos (noviembre, diciembre, enero y febrero) coinciden con la mayor tasa evapotranspirativa de referencia y de los cultivos (tabla 4.1.1 y tabla 4.2.2) mientras que, en los meses más lluviosos (junio y julio), la ETo y ETc disminuyen de manera considerable, bajando a menos de un milímetro diario.

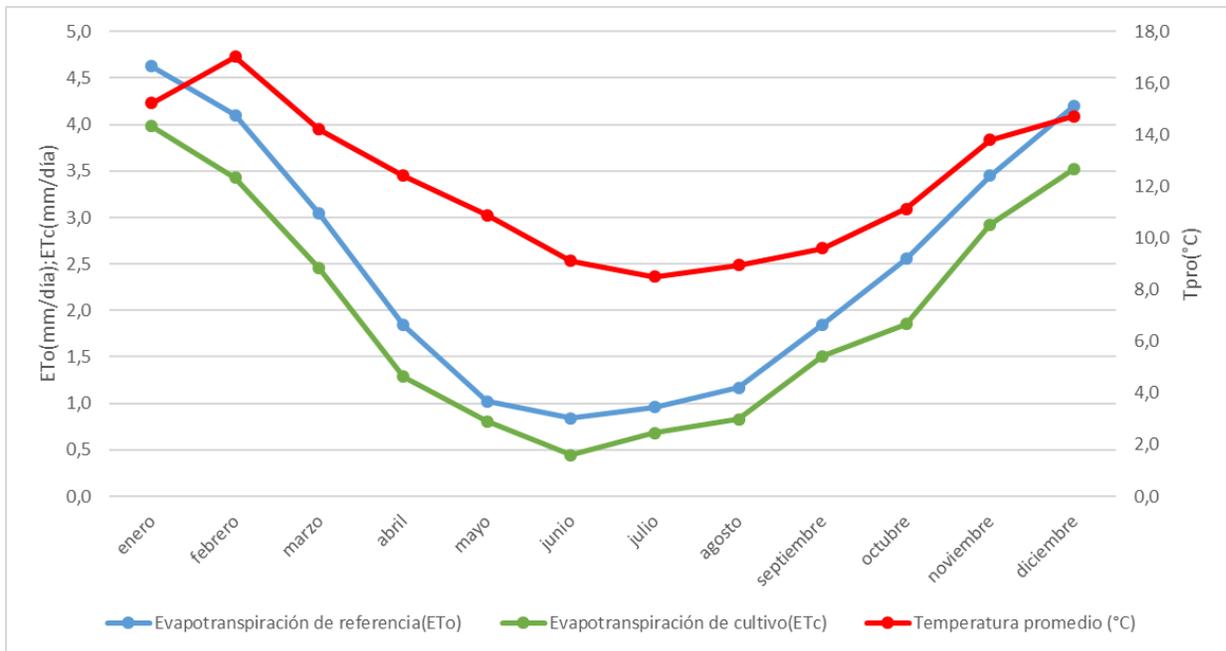


Figura 5.1.1. Temperatura promedio, Evapotranspiración de referencia y Evapotranspiración de los cultivos de la cuenca del lago Lleu-Lleu, 2019.

5.2. Factor Kc de los cultivos y Evapotranspiración real de los cultivos (ETc).

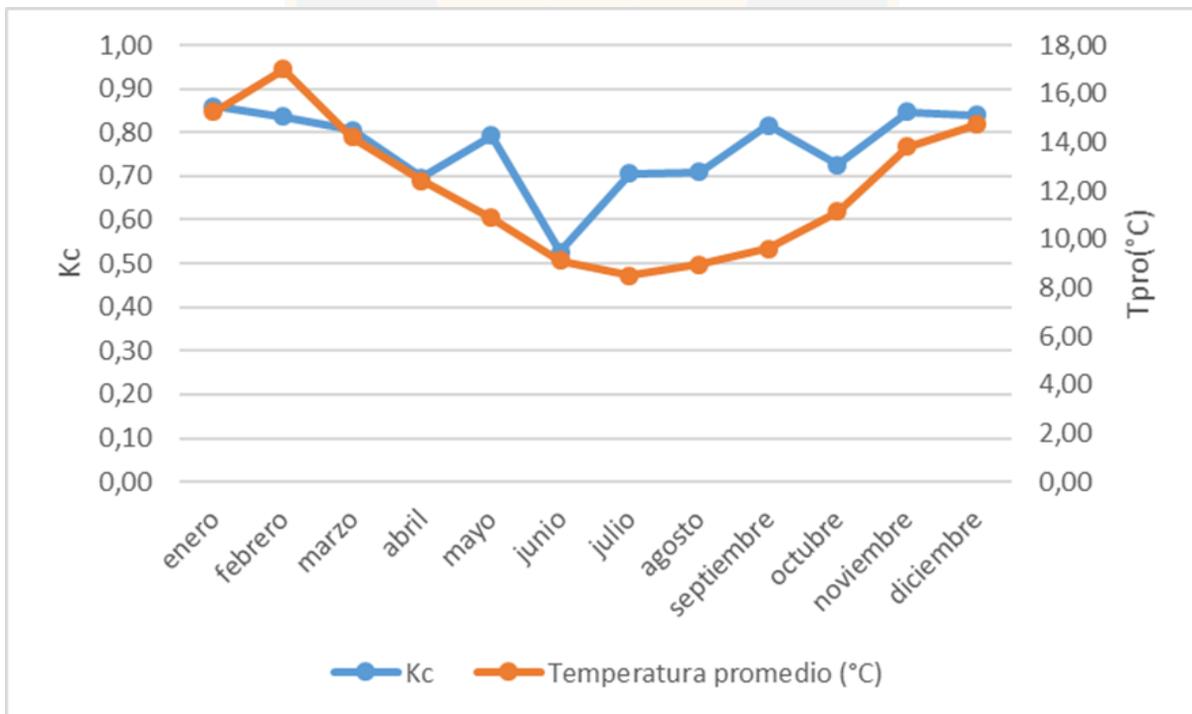


Figura 5.2.1. Temperatura promedio y factor Kc de los cultivos de la cuenca del lago Lleu-Lleu, 2019.

Los valores promedio más altos del factor K_c de los cultivos se presentaron en los meses más calurosos mientras que los valores más bajos, se presentaron en los meses más lluviosos, al igual que la E_{To} y E_{Tc} , el coeficiente de los cultivos K_c , tuvo un comportamiento (a excepción de 2 meses), proporcional a la temperatura.

En general los valores de K_c de los diferentes cultivos fueron cercanos entre sí, presentando un valor cercano a 0,9 en los meses más calurosos, mientras que, para los meses más lluviosos, los distintos usos de suelo presentaron valores de K_c cercanos a 0,6 (Tabla 4.3.1).

El tipo de vegetación que mayor valor de K_c presentó durante el año evaluado fue el *Eucalyptus Glóbulus*, seguido por el *Pinus Radiata*, matorrales y Bosque nativo.

La evapotranspiración de los cultivos cumple con el mismo patrón de comportamiento de los valores de K_c (Tabla 4.3.2).

5.3. Huella Hídrica.

La Huella Hídrica total (HH), es el resultado de la conversión de la Evapotranspiración de los cultivos (E_{Tc} , mm/día), a unidades de volumen/tiempo, por lo tanto, la Huella Hídrica real es la Evapotranspiración de los cultivos multiplicada por la superficie de cada uso de suelo ($HH = E_{Tc} * \text{superficie}$). La mayor Huella Hídrica la presentó el suelo cubierto por *Eucalyptus Glóbulus*, seguido por el *Pinus Radiata*, Matorrales y el Bosque nativo. Este resultado es el más esperado ya que el *Eucalyptus Glóbulus* fue el que presentó mayor E_{Tc} y mayor superficie cubierta por vegetación.

Los meses en donde se presentaron los mayores valores de huella hídrica, fue en los meses más calurosos (enero, febrero, noviembre y diciembre), mientras que, en los meses más lluviosos se registraron los menores valores de huella hídrica (Tabla 4.2.2).

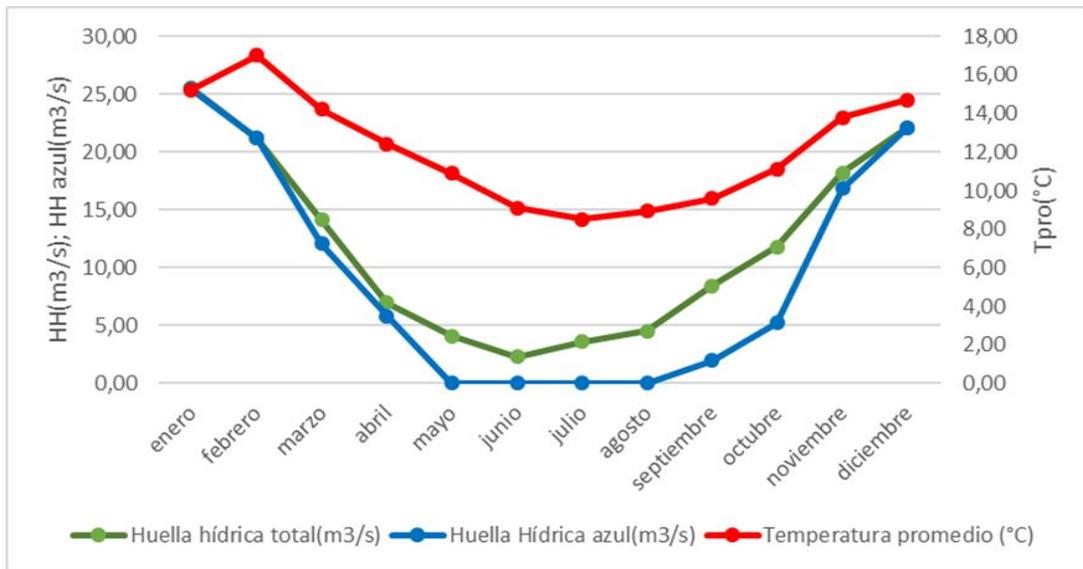


Figura 5.3.1. Huella hídrica total, huella hídrica azul y temperatura promedio de la cuenca del lago Llu-Llu.

La huella hídrica azul presentó el mismo comportamiento que la huella hídrica total, no así la huella hídrica verde.

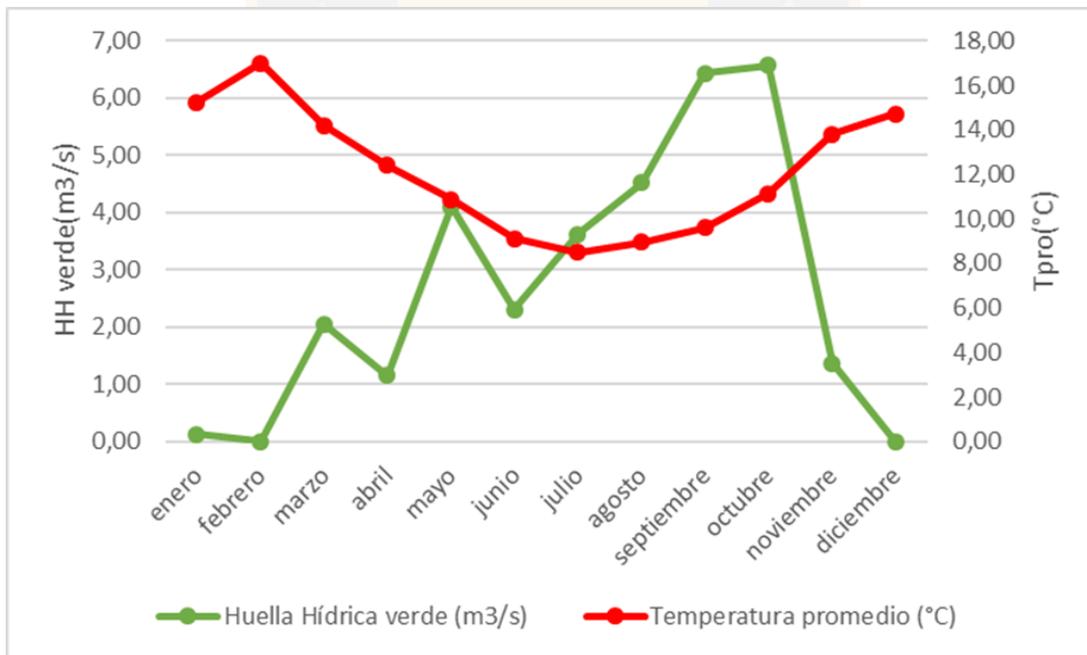


Figura 5.3.2. Huella hídrica verde y temperatura promedio de la cuenca del lago Llu-Llu, año 2019.

El mayor consumo de agua es proveniente del agua azul (HH azul). Este resultado es predecible, ya que la mayor tasa evapotranspirativa se da en los meses de escasas o nulas precipitaciones (Tabla 4.2.4)

5.4. Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica.

El período donde se registró un mayor índice de sostenibilidad, fue en los meses más calurosos, donde existe una mayor evapotranspiración de referencia (ET_o), una mayor ET_c y una mayor HH de los diferentes tipos de vegetación. Para estos meses el índice de sostenibilidad presentó un consumo de entre 80% y 90% del total del agua disponible. (Figura 4.4.2).

Si no se sobrepasa el 100% del consumo de agua disponible en una cuenca hidrográfica, quiere decir que no se ha violado el caudal mínimo ecológico, que es el caudal mínimo necesario para preservar la biodiversidad de un ecosistema.

Si bien en ningún mes del período de evaluación se sobrepasó el 100% del consumo de agua disponible, no se debería descuidar la observación del consumo de agua en estos meses en períodos futuros, ya que ante un escenario de cambio climático y un aumento considerable en las temperaturas promedio, se podría sobrepasar el 100% del consumo de agua disponible y violar el caudal mínimo ecológico.

No se evaluó el índice de consumo de agua verde por mismas recomendaciones de Hoekstra *et al*, (2011), además el mayor consumo de agua, se da en meses donde la huella hídrica verde es baja o nula. (Tabla 4.2.4)

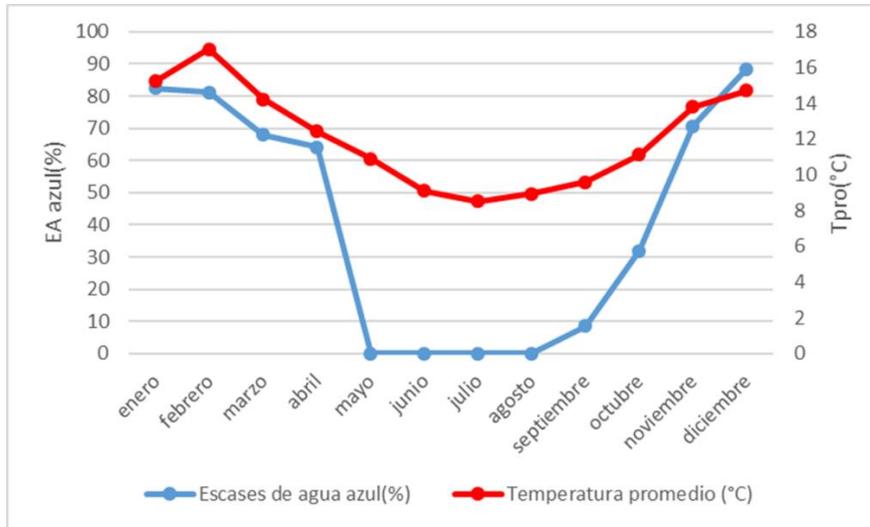


Figura 5.4.1. Escases de agua azul y temperatura promedio de la cuenca del lago Lleu-Lleu, 2019.

La sostenibilidad de la huella hídrica se evaluó a través de la escasez de agua azul, la cual exige determinar el caudal mínimo ecológico (CME).

El caudal mínimo ecológico se extrae de la escorrentía natural (Enat), no de la escorrentía real, ya que esta última ya ha sido afectada aguas arriba. Se puede estimar la escorrentía natural como la escorrentía real más la huella hídrica azul dentro de la zona de captación. (Hoekstra et al,2011).

La metodología utilizada para determinar el caudal mínimo ecológico fue la que se expone en la letra b) del decreto 14 del ministerio de medio ambiente (MMA), la cual ordena que se debe calcular el CME desde la escorrentía total (Et), no desde la escorrentía natural (Enat), lo que entra en contradicción con el manual de huella hídrica de la FAO. Además, en el artículo 6° mismo decreto 14 del MMA se expone: “El Ministerio de Obras Públicas, en casos calificados, mediante decreto supremo y previo informe favorable del Ministerio del Medio Ambiente, podrá fijar un caudal ecológico mínimo diferente al establecido en el

artículo 3° de este reglamento, no pudiendo afectar derechos de aprovechamiento de aguas ya existentes. Previo a su dictación, dicho decreto supremo se sujetará a lo dispuesto en el artículo 71 letra f) de la ley N° 19.300. El caudal ecológico mínimo que se fije en virtud de lo dispuesto en el presente título se establecerá para un cauce, para una sección o para un sector de aquel y no podrá superar el cuarenta por ciento del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial en dicho cauce, sección o sector”.

En el artículo 7° del mismo reglamento se define lo que podría considerarse como un caso calificado:

“Son casos calificados aquellos en los que se identifiquen riesgos en la calidad de las aguas y/o el hábitat de magnitud tal que comprometan la supervivencia de las especies, de acuerdo a alguno de los siguientes criterios, los que deberá tener en consideración el Ministerio del Medio Ambiente al emitir su informe...”.

La cuenca del lago Lleu-Lleu, no tiene derechos de agua constituidos, por lo tanto, la determinación del CME se acopla a la letra b) del decreto 14, sin embargo, esta cuenca podría llegar a considerarse un caso “calificado”, lo cual implicaría una variación en el caudal mínimo ecológico, en la disponibilidad de agua azul y en la sostenibilidad de la huella hídrica. Si la cuenca del lago Lleu-Lleu, llegara a considerarse un caso calificado, el caudal mínimo ecológico seguiría determinándose a partir de los valores de la esorrentía total, no de la esorrentía natural como lo propone la FAO.

6. Conclusión

Se evaluó la huella hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu durante todo un ciclo hidrológico y se evaluó su sostenibilidad ambiental de forma mensual.

Según los datos obtenidos de la variabilidad climática, se concluye que los valores K_c de los cultivos, los valores de las evapotranspiraciones reales (ETc) y los de la evapotranspiración de referencia (ETo), aumentan a medida que aumenta la temperatura promedio, por otro lado, cuando la temperatura disminuye y las precipitaciones aumentan disminuye la tasas evapotranspirativa de los cultivos, los valores de K_c y los valores de la evapotranspiración potencial.

Los suelos cubiertos por *Eucalyptus Glóbulus* y *Pinus Radiata* presentaron una mayor ETc promedio y una mayor huella hídrica, mientras que los suelos cubiertos por Matorrales y Bosque nativo presentaron una menor ETc y una menor huella hídrica durante todo el ciclo en evaluación.

Los valores mayores del índice de sostenibilidad de agua azul, se presentaron en los meses más calurosos y fluctuaron entre un 80% y 90% aproximadamente. Esto indica que en los meses más calurosos se consumió entre un 80% y 90% del total del agua disponible, o sea, no existieron puntos críticos dentro del período en evaluación, por lo tanto, en ningún momento se violó el caudal mínimo ecológico (según el criterio de evaluación del CME del MMA)

Si bien la huella hídrica presentó índices de sostenibilidad positiva, no es un resultado concluyente a futuro, ya que como se observó, la tasa evapotranspirativa aumenta a medida que aumentan las temperaturas, por lo tanto, en un escenario de alza de temperaturas, el consumo de agua podría sobrepasar la disponibilidad hídrica de la cuenca, violando el caudal mínimo ecológico.

Los factores que determinan que en una cuenca hidrográfica y en un intervalo de tiempo definido la huella hídrica sea sostenible son muchos, como la variabilidad climática, la edad, condición y superficie de los cultivos, la morfología de la cuenca, entre otros.

Una mayor temperatura promedio provoca una mayor ETo, por lo tanto, la huella hídrica en zonas con mayores temperaturas que en la cuenca analizada en este informe podrían presentar problemas de escasez hídrica.

El manual de evaluación de huella hídrica de la FAO, propone extraer el CME de la escorrentía natural, mientras que el decreto 14 del MMA, lo extrae de la escorrentía total. Mientras no exista consenso en el criterio de evaluación del CME no se podrá analizar la sostenibilidad de la huella hídrica de forma certera.

El método de huella hídrica de la FAO y los datos climatológicos y de cultivos extraídos desde distintas fuentes permitieron evaluar la huella hídrica de la cuenca del lago Lleu-Lleu y la sostenibilidad ambiental de esta misma, existiendo aún, una falta de consenso en la evaluación del CME.

7. Bibliografía

AQUASTAT - Sistema Mundial de Información de la FAO sobre el agua en la agricultura.

(s. f.). <https://www.fao.org/aquastat/es/>

Becerra, P. I. (2006). Invasión de árboles alóctonos en una cuenca pre-andina de Chile central. *Gayana. Botánica*, 63(2), 161-174.

Bucher, E., Castro, G., & Floris, V. (1997). Conservación de ecosistemas de agua dulce: Hacia una estrategia de manejo integrado de recursos hídricos. I p.

Chile, I. (2017, 24 febrero). *Límites cuencas*. <https://www.ide.cl/index.php/medio-ambiente/item/1678-limites-cuencas>.

Conaf.cl. <https://sit.conaf.cl/exp/ficha.php>

Decreto supremo 14 (MMA). Aprueba reglamento para la evaluación del caudal ecológico mínimo. (2013)

De Souza, M.J.H., A. Ribeiro, H.G. Leite, F.P. Leite y R.B. Minuzzi. 2006. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em tres regiões da Bacia do Rio Doce. *Rev. Árvore*, 30(3), 399-410 p.

De Robles, B. E. R. (2007). Una visión sostenibilista sobre la escasez del agua dulce en el mundo. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 2, 86 p.

Dooge, J.C.I., 1973. Linear theory of hydrological systems. USDA, ARS, Tech. Bull, on 1468, Washington D.C.

FAO, (1972). Estudio FAO Riego y drenaje. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma(Italia).

Gonzaga Aguilar, C. (2014). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

HOEKSTRA, A.Y. Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., (2009). Water footprint manual: State of the art 2009. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assesment Manual: Setting the Global Standard*, London, UK: EarthScan.

- Hoekstra, A. Y. & Hung, P. Q. (2005). Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 15(5), 45–56
- Huber A, A Iroumé, J Bathurst. 2008. Effect of Pinus radiata plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes*. 22: 142-148 p.
- INFOR. Anuario Forestal 2015. (2015). Boletín Estadístico N° 150. 25 p.
- Kremen, C. & Li, S. (2015). Systems integration for global sustainability, *Science*, 347(6225), 963-972.
- Lattermann, A., 1991. System-Theoretical modelling in surface water hydrology. Springer-Verlag, Berlin.
- FAO. 2021. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. Roma (Italia), 36 p.
- Inventario forestal continuo INFOR*. (s. f.).
- <https://ifn.infor.cl/#:~:text=Las%20plantaciones%20forestales%20del%20pa%C3%ADs,ha%20respecto%20del%20a%C3%B1o%20anterior.&text=El%20Inventario%20Forestal%20Nacional%20es,a%C3%B1o%202000%20a%20la%20fecha.>
- Iroumé, A., O. Mayen y A. Huber. 2006. Runoff and peakflow responses to timber harvest and forest age in southern Chile. *Hydrological Processes* 20: 37–50.
- Martínez-Conde Campos, Á. I. (2022). Impacto hidrológico de plantaciones forestales en cuencas de la Región del Maule: Huenchullami, Purapel y Perquilauquén.
- MasterGIS. (2022, 21 septiembre). *Curso de la semana: Geoestadística aplicada al medio ambiente* 📺 [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=tcCFQ3YIgAM>

Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Science*, 15, 1577-1600.

MOP - Chile. (s. f.). <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>.

Muñoz Aguayo, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación.

Naciones Unidas, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. UNESCO, París.

Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Ulloa, C., Urrutia, R., & Rudolph, A. (2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 40 p.

Philipps, C. B. (2013). Caudal ecológico o mínimo: regulación, críticas y desafíos. *Actas de Derecho de Aguas N° 3*, 2 p.

Parra, O. Valdovinos, C. Urrutia, R. Cisternas, M. Habit, E y Mardones, M. Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central. Unidad de Sistemas Acuáticos, Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, Universidad de Concepción. (Chile), 55p.

Productos grillados. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2, s. f.

¿Qué son los datos NetCDF? —ArcGis Pro | Documentación. (s. f.). <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/multidimensional/what-is-netcdf-data.htm>

Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M. H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., ... & Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water resources research*, 51(7), 5217-5238.

Rose Calvin. 2004. An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds, University of Cambridge, United Kingdom.

Santillán Gutiérrez, E., Davila-Vazquez, G., Sánchez, J. D. A., & Díaz Torres, J. D. J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonos, Veracruz, México. *Revista Ambiente & Agua*, 8, 104-117.

SpA, S. A. C. (2016). Actualización de cifras y mapas de desertificación; degradación de la tierra y sequía en Chile a nivel de comunas. *Santiago*.

Tolba, M. K. (1992). Recursos de agua dulce y calidad del agua. *Salvemos El Planeta*, 46 p.

Van Veenhuizen, R. (2000). Revisión de bases técnicas.

Unesco. 1981. Methods for Water Balance Computation. Instituto de Hidrología de España. España.

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, y Wiberg, D. (2016). Modelar el uso global del agua para el siglo XXI: la iniciativa Water Futures and Solutions (WFaS) y sus enfoques. *Desarrollo de modelos geocientíficos*, 9 (1), 175-222.

World Resources Institute | Making Big Ideas happen. (s. f.). World resources institute.

<https://www.wri.org/>

8. Anexos

Tabla 8.1 “error” de las interpolaciones mensuales “Kriging” e “IDW”, realizadas en el software ArcGis 10.8 a los valores mensuales del factor Kc de los cultivos de las cuencas del lago Lleu-Lleu.

mes	Kriging	IDW
enero	0,001525	0,004741
febrero	-0,000586	0,001893
marzo	0,022043	0,001369
abril	0,000669	0,002463
mayo	-0,006557	-0,004484
junio	0,004138	0,00751
julio	-0,003499	-0,001072
agosto	-0,000628	0,001187
septiembre	-0,000536	0,000871
octubre	0,001769	0,005312
noviembre	0,000025	0,000783
diciembre	-0,001776	-0,00065