



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL TRANSPORTE  
DE SEDIMENTOS PARA TRES RÍOS DE LA ZONA  
CENTRO-SUR DEL PAÍS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**OSCAR FRANCISCO ANDRÉS FERNÁNDEZ REYES**

**PROFESOR GUÍA**  
YARKO NIÑO CAMPOS

**PROFESOR CO-GUÍA**  
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI

**COMISIÓN**  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

SANTIAGO DE CHILE  
2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL  
POR: OSCAR FRANCISO ANDRÉS  
FERNÁNDEZ REYES  
FECHA: 17 de mayo del 2021  
PROFESOR GUÍA: YARKO NIÑO CAMPOS**

## **EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA TRES RÍOS DE LA ZONA CENTRO-SUR DEL PAÍS**

El cambio climático es un fenómeno que ha sido bastante estudiado en cuanto a disponibilidad futura de agua, donde se tiene una gran cantidad de trabajos que hablan acerca de estimaciones de caudales considerando los escenarios futuros que se proponen, tales como el RCP 2.6 y RCP 8.5. Sin embargo, una componente que ha sido poco estudiada en el país corresponde al impacto que tendrá el cambio climático en el transporte de sedimentos.

Este trabajo consiste en analizar la variación de sedimentos que transportan los ríos de la zona centro-sur del país en el escenario futuro, el cual corresponde al periodo 2030 – 2060, utilizando proyecciones de caudales bajo el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5. Para lograr lo anterior se estudian las dos componentes que tiene el gasto sólido, correspondientes al gasto sólido suspendido (GSS) y el gasto sólido de fondo (GSF). Además, mediante el método RUSLE/SDR, se estudia la cantidad de sedimentos que se aporta dado el lavado de cuenca que ocurre por las precipitaciones tanto en la actualidad como en el período futuro.

Las cuencas seleccionadas para estudiar el fenómeno corresponden a tres, las cuales son “Río Tinguiririca Bajo Los Briones”, “Río Loncomilla en Las Brisas” y “Río Itata en Coelemu”, que se ubican en la región de O’Higgins, Maule y Ñuble, respectivamente. En estas, las variaciones de caudal a nivel anual para el escenario RCP 2.6 (RCP 8.5) corresponden a -7.59 (-5.55), - 7.56 (-1.93) y -7.90 (-2.72) [%], respectivamente.

Los resultados indican que el peor escenario corresponde al RCP 2.6, puesto que es donde se presenta una mayor reducción de caudal. Para la cuenca del río Tinguiririca, Loncomilla e Itata bajo el escenario RCP 2.6 (RCP 8.5), el GSS presentan disminuciones del 23.43 (12.89), 13.96 (2.89) y 12.42 (3.72) [%], respectivamente. Por parte del método RUSLE/SDR, se tienen variaciones del 4.83 (16.03), 2.15 (6.69) y 3.43 (19.17) [%], respectivamente. En cuanto al GSF, la variación en sus estadísticas corresponde a -0.37 (-0.22), -1.17 (0.15) y -8.36 (-1.21) [%] para cada una de las cuencas en el orden mencionado.

Dado los resultados, no se hace posible obtener una tendencia de las disminuciones para aplicar a otras cuencas, ya que el problema no es tan trivial como calcular valores para una cuenca y traspasarlos a otra, sino que es una problemática a resolver para cada cuenca.

*Dedicado a ti,  
Que siempre me cuidas donde sea que estés.*

## **Agradecimientos.**

Con este trabajo se da término a una de las etapas más difíciles hasta ahora de mi corta vida, en las cuales hubo un sinnúmero de personas que conocí y me ayudaron a salir adelante. Aún recuerdo las palabras que me dijeron los primeros días de la universidad, “Disfruta cada momento porque se te va a hacer corta la estancia”. Hasta este momento es que le tomo peso a lo que me dijeron, ya que si me pongo a ver hacia atrás, en verdad se hizo corta la estadía en la universidad; y no me quedan dudas de que fue gracias a los gratos momentos que pude compartir con mis amigos.

Debo agradecer a mi familia, por el hecho de darme la oportunidad de estudiar en Santiago, lo cual hizo toda la experiencia más entretenida. También, agradezco a ellos por todas las facilidades que me han dado desde que empecé este proceso y todo su apoyo incondicional. Agradezco igual a mi perrito, el Tempo, que me sacó una sonrisa en los momentos más estresantes de este trabajo.

Gracias a mis amigos de la universidad, a los que siguen y a los que se quedaron en el camino, sin ellos, ni su apoyo, este trabajo no podría haberse realizado. Se me hace imposible no nombrar a los más importantes, Richi, Mauri, Nico y Gumi, cada momento que disfrutamos en la universidad lo llevaré en mi corazón por la eternidad. Agradecer a todos mis amigos de civil y de hidráulica, con los cuales viví más de la mitad de este viaje, por darme la oportunidad de disfrutar diversos momentos con ellos, tanto haciendo trabajos hasta tarde como pasándola bien en diferentes ocasiones.

Gracias Graci por acompañarme casi todos los años que duró este viaje, por ser una muy buena amiga, animarme en mis días tristes, vivir conmigo la felicidad del día a día y apoyarme especialmente en los últimos años de universidad.

También, agradezco a mis fieles amigos de Talca, que a pesar de que me aparté de ellos por un tiempo dada la distancia, cuando volví me incorporaron como si nunca me hubiera ido.

Debo agradecer también a mi compañera de vida, Sofi, desde hace 9 años que llevas creyendo en mí y queriéndome incondicionalmente. Gracias por darme todo lo que necesitaba las veces que me hacía carencia algo, no sólo material, si no también emocional.

Y muchas gracias al profesor Yarko Niño, por permitirme vivir este proceso con él, por su confianza y resolver las dudas que me fueron surgiendo en el camino. De igual manera, agradecer al profesor Aldo Tamburrino y Santiago Montserrat, por hacerme ver aristas del problema que no había considerado.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1.- Motivación. ....	1
1.2.- Objetivos. ....	2
1.2.1.- Objetivo General. ....	2
1.2.2.- Objetivos Específicos.....	2
1.3.- Organización del informe.....	2
Capítulo 2 : Revisión Bibliográfica.....	4
2.1.- Cambio Climático. ....	4
2.1.1.- Cambio Climático Global.....	4
2.1.2.- Cambio Climático en Chile.....	7
2.2.- Transporte Hidráulico de Sólidos.....	8
2.2.1.- Gasto sólido.....	8
2.2.2.- Aportes del Gasto sólido. ....	11
2.2.3.- Mediciones del Gasto Sólido Suspendido.....	12
2.3.- Estimación Gasto Sólido a Futuro en el Mundo. ....	13
2.4.- Hipótesis del Trabajo. ....	13
2.5.- Conclusiones. ....	13
Capítulo 3 : Zonas de Estudio.....	15
3.1.- Antecedentes Generales Río Tinguiririca Bajo Los Briones. ....	15
3.2.- Antecedentes Generales Río Loncomilla en Las Brisas.....	18
3.3.- Antecedentes Generales Río Itata en Coelemu. ....	21
Capítulo 4 : Metodología y Recopilación de Datos.....	24
4.1.- Selección de Cuencas.....	24
4.2.- Estimación Caudal a Futuro. ....	24
4.3.- Estadísticas Estaciones Sedimentométricas y Relaciones.....	27
4.3.1.- Obtención Relaciones Gasto Sólido Suspendido y Caudal.....	28
4.4.- Método RUSLE/SDR.....	28
4.4.1.- Erosividad de la Lluvia (Factor R).....	30
4.4.2.- Erodabilidad del Suelo (Factor K). ....	31
4.4.3.- Factor debido a la Topografía (Factor LS).....	32
4.4.4.- Cubierta del Suelo (Factor C).....	33
4.4.5.- Prácticas de Conservación del Suelo (Factor P).....	34

4.4.6.- Índice SDR.....	34
4.5.- Gasto Sólido de Fondo.....	35
4.5.1.- Curvas Granulométricas.....	36
4.5.2.- Altura de Escurrimiento y Pendiente.....	36
4.5.3.- Cálculo Gasto Sólido de Fondo.....	36
Capítulo 5 : Resultados Obtenidos.....	39
5.1.- Relaciones Gasto Sólido Suspendido.....	39
5.2.- Método RUSLE/SDR.....	46
5.2.1.- Río Tinguiririca Bajo Los Briones.....	47
5.2.2.- Río Loncomilla en Las Brisas.....	53
5.2.3.- Río Itata en Coelemu.....	59
5.2.4.- Análisis de Resultados.....	64
5.3.- Gasto Sólido de Fondo.....	65
5.3.1.- Curvas Granulométricas.....	65
5.3.2.- Obtención GSF.....	68
Capítulo 6 : Conclusiones y Recomendaciones.....	73
6.1.- Conclusiones.....	73
6.2.- Recomendaciones.....	74
Capítulo 7 : Bibliografía.....	75
Anexo A: Resultados GSS.....	i
Anexo B: Capas utilizadas en el método RUSLE/SDR.....	v
Anexo C: Fotografías utilizadas en la obtención de la Curva Granulométrica.....	xix
Anexo D: Datos Utilizados para obtener el Gasto Sólido de Fondo.....	xxi
Río Tinguiririca Bajo Los Briones.....	xxi
Río Loncomilla en Las Brisas.....	xxii
Río Itata en Coelemu.....	xxiii

# Capítulo 1 : Introducción.

## 1.1.- Motivación.

El cambio climático es un problema ya conocido por muchos, en donde uno de sus efectos corresponde a la modificación de variables meteorológicas e hidrológicas, tales como la temperatura, la precipitación y la escorrentía. En Chile, el panorama no es distinto, previendo un aumento de temperaturas y en general una disminución en cuanto a las precipitaciones y caudal en los ríos (Ministerio del Medio Ambiente, 2015). Ante esto, diferentes estudios se han centrado en estimar las variaciones del caudal futuro basándose en escenarios posibles (Vicuña. et al, 2011; DGA, 2017). Por otro lado, no se han realizado estimaciones referentes al transporte hidráulico de sólidos, donde se tienen dos componentes, una asociada a un transporte suspendido y otra asociada a un gasto de fondo, en donde estos se dividen según el tamaño de la partícula.

En este contexto, se han realizado varios análisis del transporte de sólidos suspendidos alrededor del mundo en los cuales se incluye la variable del cambio climático. En China, Zhou et al. (2017) indican que tanto la escorrentía como la producción de sedimentos aumentarán para cuencas de alta latitud bajo el escenario del cambio climático, lo cual se aprecia en el trabajo de Dibike et al. (2018), en donde al realizar el estudio en el río Athabasca ubicado en Canadá, obtuvieron que tanto el caudal como la concentración de sedimentos incrementarán a futuro.

En contraste a lo anterior, también en China, en cuencas con un clima semiárido, se realizó un estudio que involucra la relación de caudales con la producción de sedimentos, en donde se apreció una reducción en las dos variables considerando el cambio climático, además de una baja de las precipitaciones (Lu et al., 2013).

Considerando las dos situaciones expuestas, en Chile, como se dijo anteriormente, se tiene el pronóstico de que tanto los caudales y precipitaciones se verían reducidos, siendo la situación más parecida a la última descrita, por lo que se espera una baja en la producción de sedimentos.

La motivación de este trabajo consta en el estudio de los sedimentos en los ríos chilenos y ver como cambiaría la producción de estos considerando el cambio climático, puesto que estos son importantes para poder estimar degradaciones de cauce y los problemas que se pueden tener. Un ejemplo de lo anterior corresponde a que en ríos donde se tenga una menor producción de sedimentos se sigan extrayendo estos de la misma forma que se hace hoy en día, lo cual podría traducirse en poner en peligro estructuras cercanas.

## 1.2.- Objetivos.

### 1.2.1.- Objetivo General.

Estimar de manera simple el transporte de sedimentos para ríos de la zona centro-sur del país dado el efecto que tiene el cambio climático en el caudal.

### 1.2.2.- Objetivos Específicos.

- 1.- Realizar una revisión bibliográfica para poder estimar el gasto sólido de fondo y suspensión asociado a los ríos de la zona centro-sur de Chile.
- 2.- Determinar los valores del gasto sólido de fondo y en suspensión asociado a los ríos de zona centro-sur de Chile para el período entre 2030 y 2060.
- 3.- Estudiar los motivos por los cuales existen fluctuaciones en el transporte de sedimentos suspendidos frente a un mismo caudal en los ríos estudiados.
- 4.- Comparar el escenario actual y futuro del gasto sólido de fondo y en suspensión para obtener una tendencia de su comportamiento.

## 1.3.- Organización del informe.

El presente trabajo de memoria de título se compone de seis capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción**, se describe la problemática a estudiar, la cual corresponde a las proyecciones del cambio climático para el sedimento que transportan los ríos de la zona centro-sur del país.
- **Capítulo 2: Revisión bibliográfica**, se presentan antecedentes respecto al cambio climático, tanto a nivel global como la situación a nivel país en cuanto a la variación de temperaturas y precipitaciones. También, se ahonda en el transporte hidráulico de sólidos, mostrando relaciones que tiene este con el caudal para el gasto sólido de fondo y el gasto sólido suspendido, además de diferentes fuentes aportantes. Finalmente, se presentan resultados respecto a la variación del gasto sólido en diferentes países.
- **Capítulo 3: Zonas de Estudio**, se presentan antecedentes de las tres cuencas seleccionadas para realizar las proyecciones del cambio climático en el transporte de sedimentos. En estas se presentan información respecto al régimen de las cuencas, el clima que presentan y la cantidad de estaciones meteorológicas y fluviométricas que se encuentran disponibles.
- **Capítulo 4: Metodología**, se describe la metodología a seguir para aplicar el efecto del cambio climático al análisis, mostrando los caudales en el escenario futuro, además de cómo se trabaja para obtener el gasto sólido suspendido, el gasto sólido de fondo y los factores para analizar la cantidad de sedimento por el lavado de cuenca (método RUSLE/SDR).



- **Capítulo 5: Resultados Obtenidos**, se presentan los resultados obtenidos en las tres cuencas a partir de lo descrito en la metodología. Esto corresponde a la variación del gasto sólido suspendido, del método RUSLE/SDR y del gasto sólido suspendido. Además se presenta un análisis para cada una de las componentes indicadas anteriormente.
- **Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones**, se presentan las principales conclusiones de los análisis obtenidos en la sección anterior. También, se presentan recomendaciones en caso de que se quiera trabajar este problema con la misma metodología propuesta para otras cuencas del país.

## Capítulo 2 : Revisión Bibliográfica.

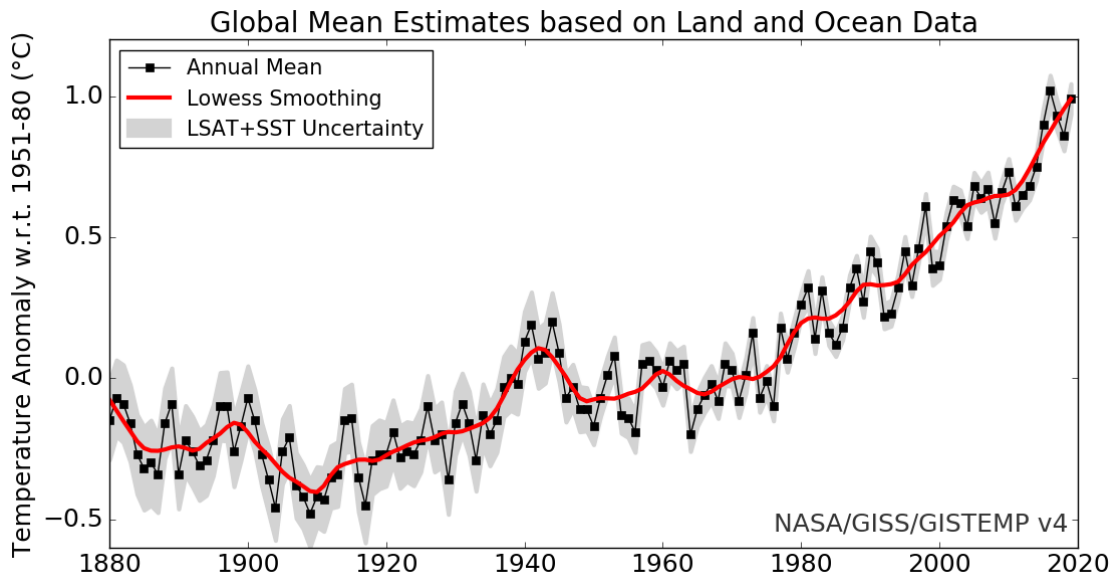
En la siguiente sección se presenta una revisión bibliográfica enfocándose en la primera parte, sobre el cambio climático, dando antecedentes de cómo se ven afectadas variables meteorológicas como la temperatura y precipitación bajo dos escenarios distintos. También, en este mismo contexto, se indica cómo afectaría esto al país, viendo las variaciones que se tienen para la temperatura y precipitación. Asimismo, se presenta información respecto al transporte de sedimentos que se tiene en los ríos, definiendo el gasto sólido en suspensión como el de fondo. Además, se indican fuentes del gasto sólido en suspensión y como es la variabilidad que se tiene de esto frente al cambio climático dado estudios realizados en otros países.

### 2.1.- Cambio Climático.

El cambio climático se define, según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, como el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial, y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. Dada esta definición, se puede asociar que existen cambios de las variables meteorológicas como la temperatura y la precipitación, con lo cual existirá una variabilidad en el recurso hídrico superficial, puesto que este último se encuentra fuertemente relacionado con estas variables.

#### 2.1.1.- Cambio Climático Global.

Por parte de la temperatura, en la Figura 2.1 es apreciable la tendencia de la anomalía que tiene ésta en los últimos años con respecto al promedio entre 1951 y 1980 (“GISS Surface Temperature Analysis (v4)”, 2019).



**Figura 2.1:** Anomalía de la temperatura desde el año 1880 hasta 2019 con respecto al promedio entre 1951 y 1980 (Fuente: “GISS Surface Temperature Analysis (v4)”, 2019).

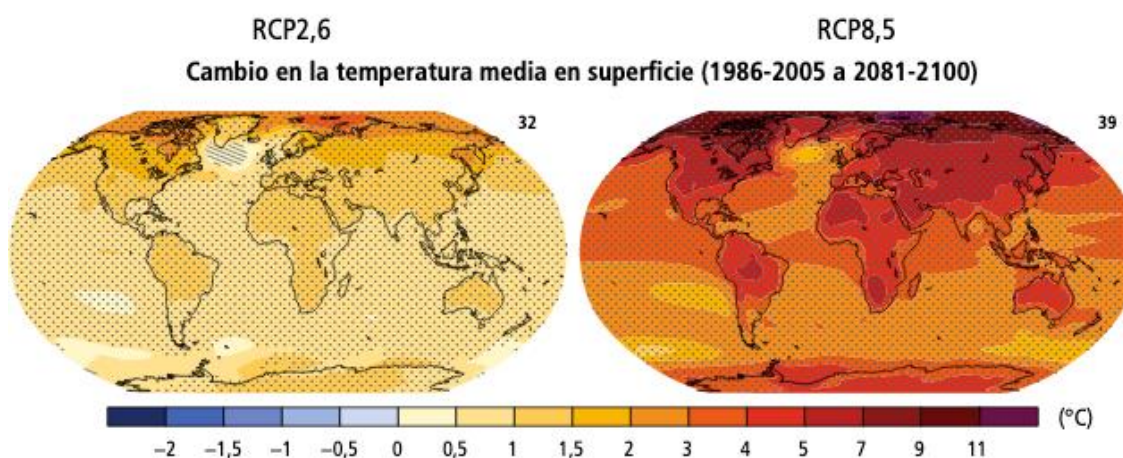
Como se aprecia en la Figura 2.1, la tendencia que se tiene es un aumento de la temperatura media, donde desde el año 1966 esta aumenta en un mayor grado que con respecto a los años anteriores. Considerando que este aumento es probable a futuro, se ha estudiado este problema por varios autores y entidades internacionales.

Para estudiar las consecuencias que tendrá el cambio climático en un futuro se hace uso de escenarios, en donde en el año 2013 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (desde ahora IPCC, por sus siglas en inglés), en su quinto informe sobre el cambio climático, define cuatro escenarios de emisión, denominados Trayectorias de Concentración Representativa (desde ahora RCP, por sus siglas en inglés), los cuales corresponden a RCP 2.6, 4.6, 6.0 y 8.5. Estos tienen diferentes características, siendo el escenario RCP 2.6 el más favorable, mientras que el RCP 8.5 es el más desfavorable. A continuación, se presenta en la Tabla 2.1 las características de cada uno de estos escenarios.

**Tabla 2.1: Escenarios climáticos (RCP) y sus características.**

	Forzamiento Radiativo (FR) [W/m <sup>2</sup> ]	Tendencia FR	[CO <sub>2</sub> ] en 2100
RCP 2.6	2.6	Decreciente en 2100	421 [ppm]
RCP 4.5	4.5	Estable en 2100	538 [ppm]
RCP 6.0	6.0	Creciente	670 [ppm]
RCP 8.5	8.5	Creciente	936 [ppm]

Considerando los escenarios anteriores, el IPCC en el año 2014 publica en su quinto informe sobre el cambio climático las predicciones que se tienen hacia el futuro en los años 2081 – 2100. En la Figura 2.2 se pueden observar predicciones de la temperatura en base a la media multimodelos para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, donde para el primero se utilizaron 32 modelos, mientras que para el segundo 39.



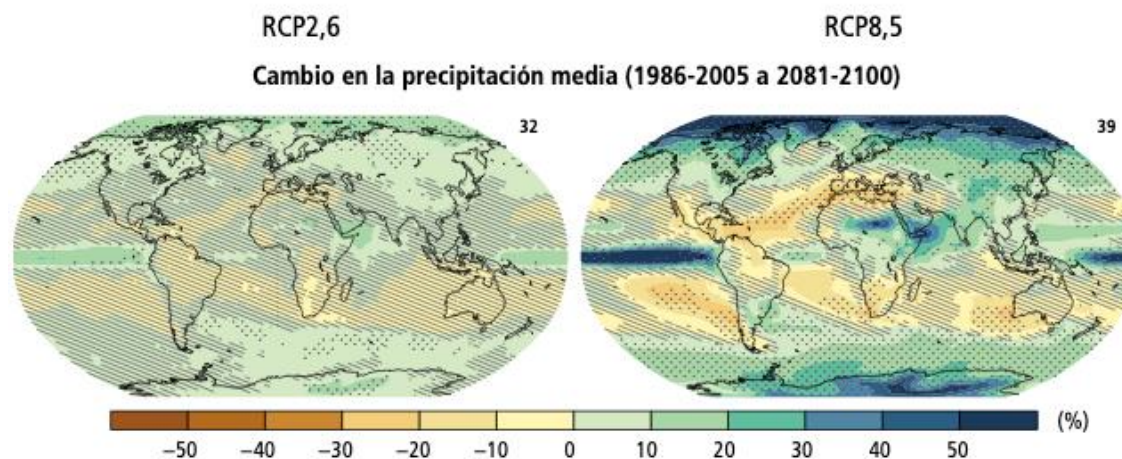
**Figura 2.2: Predicciones de temperatura para el periodo 2081 - 2100 (Fuente: IPCC, 2014).**

Es posible apreciar que, independiente del escenario que se tenga, se espera un aumento de la temperatura global. Es más, para el escenario RCP 2.6 es probable que la temperatura media suba entre 0.3 [°C] y 1.7 [°C] respecto a la situación de 1986 - 2006, mientras que para el escenario RCP 8.5 este aumento se tiene desde 2.6 [°C] a 4.8 [°C] (IPCC,

2014). Este aumento a futuro de la temperatura tiene una gran influencia en las regiones montañosas, puesto que las zonas donde se registra precipitación sólida están influenciadas por la temperatura presente. Esto dado que, para determinar si la precipitación será sólida o líquida, se debe analizar la línea de nieves, la que corresponde a la altitud desde la cual empieza a nevar.

La línea de nieves está relacionada directamente con la temperatura, ya que, por lo general, se incluye esta variable dentro de las diferentes fórmulas que existen para su cálculo. Dado el aumento de temperatura, la línea de nieves tendrá una mayor altitud, por lo que a futuro se espera un cambio en la zona que presenta una precipitación sólida (disminuyendo ésta), con lo que se tendrá un menor reservorio del recurso para la época estival. Cabe destacar, que en caso de zonas que presenten glaciares, probablemente el caudal no tenga una gran variación en la época estival, dado que al derretirse en mayor cantidad por el aumento de temperatura, suple la falta de nieve del lugar. Como consecuencia de lo anterior, existiría una disminución de la superficie del glaciar, lo cual es otro de los efectos adversos por esta problemática global.

En cuanto a la precipitación, en la Figura 2.3 se puede apreciar las variaciones que se tendrían a futuro bajo los dos escenarios analizados para la temperatura (RCP 2.6 y 8.5) y la misma cantidad de modelos utilizados.



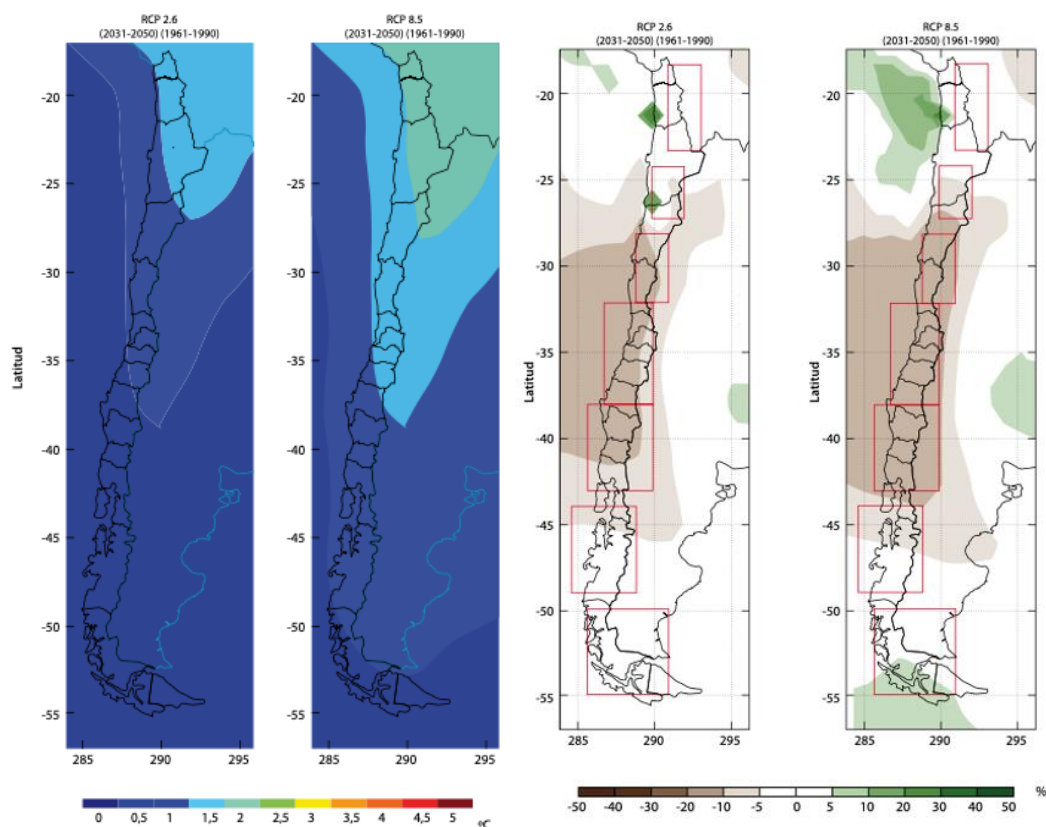
**Figura 2.3: Estimación de precipitación para el período 2081 - 2100 (Fuente: IPCC, 2014).**

En la figura anterior, se puede apreciar que probablemente bajo ambos escenarios, se tendrán tanto disminuciones como aumentos de la precipitación, las cuales se caracterizan según la zona que se encuentre estudiando. A pesar de lo anterior, es observable que se comparte la tendencia bajo ambos escenarios, es decir, en zonas donde aumenta o disminuye la precipitación en un escenario, son concordantes para el otro. Es importante indicar que, bajo el escenario RCP 8.5, los mayores aumentos se tendrían tanto para los polos como para el Océano Pacífico ecuatorial. También, según el IPCC (2014), es muy probable que sean más intensos y frecuentes los episodios de precipitación extrema en la mayoría de las masas terrestres de latitud media y en regiones tropicales húmedas.

### 2.1.2.- Cambio Climático en Chile.

En el país se han publicado diversos documentos que hacen relevancia a esta problemática, dentro de los que se incluye la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017) y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático publicado por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en el año 2015. Es en este último donde se presentan efectos que presentaría Chile bajo este fenómeno global, tales como cambios en la temperatura y precipitación, frecuencia de eventos extremos e impactos sectoriales que se podrían tener.

Por parte de la temperatura y precipitación, se aprecia en la Figura 2.4 cómo se modificarían éstas en base a los mismos escenarios estudiados anteriormente (RCP 2.6 y 8.5).



**Figura 2.4: Variación de Temperaturas y Precipitación para el periodo 2030 - 2050 (Fuente: MMA, 2015).**

Como es apreciable de la figura anterior, si bien existe una variación por parte de la temperatura, el calentamiento promedio que se produce es menor al comparado con el aumento de temperaturas global (MMA, 2015). Un patrón por observar es que, independiente del caso que se analice, existe un aumento de temperatura tanto para la zona norte como para la zona centro, mientras que la zona sur y austral el aumento de temperaturas bajo el escenario RCP 2.6 no tiene un gran impacto. Por parte de la precipitación, es posible ver en la Figura 2.4 que en su mayoría se tiene una disminución de ésta a lo largo del país, siendo este sumamente intenso en parte de la zona norte y centro-sur de Chile. En cuanto a los aumentos

que se aprecian, estos se dan en la zona costera sur de la Región de Tarapacá y en el Estrecho de Magallanes, siendo este último sólo bajo el escenario RCP 8.5.

Como se mencionó anteriormente, estas variaciones afectan la disponibilidad del recurso hídrico, por lo cual son de suma relevancia para tener en cuenta al momento de ver la cantidad de agua que se tendrá en el futuro. Ante esta problemática, Vicuña et. al. (2011) estudiaron la disponibilidad del recurso en la cuenca del río Limarí e indicaron que la tasa de disminución del caudal promedio anual decrece a una tasa mayor a la de la precipitación, lo cual explican por el aumento de la temperatura, ya que ésta hace que la evapotranspiración incremente, por lo que las pérdidas de agua son mayores.

## 2.2.- Transporte Hidráulico de Sólidos.

En los cauces naturales, además del agua, existe otro componente de transporte, correspondiente a un acarreo de sedimentos, también conocido como gasto sólido. Los sólidos son fundamentalmente producidos por el poder erosivo del cauce, transportándose estos desde su nacimiento en la montaña y aumentando a lo largo de su camino, que corresponden a un incremento por un lavado de cuenca y pudiendo incrementar dado un origen antropogénico. Este acarreo de sólidos puede provocar una evolución en el cauce, la cual se tiene por una degradación o agradación del cauce.

En general, los sedimentos que se encuentran transportados por el cauce corresponden a granos sólidos con un diferente tamaño de partículas, clasificándose en: arcillas, limos, arena, gravas, bolones y rocas (orden de menor a mayor tamaño de partícula).

### 2.2.1.- Gasto sólido.

El gasto sólido corresponde a la tasa de transporte que se tiene en una determinada sección del cauce. Este se divide en dos tipos, el gasto sólido de fondo (GSF) y gasto sólido en suspensión (GSS), donde el primero está asociado principalmente a sedimentos granulares o no cohesivos, mientras que los segundos se tienen por sedimentos cohesivos.

- **Gasto sólido en suspensión:** Este se encuentra conformado por arcillas y limos, los cuales presentan una fuerza interparticular electroquímica, y arenas finas. También, dado el nulo peso que presentan estas, por lo general no se considera el peso en el equilibrio de fuerzas (Tamburrino y Niño, 2013).

En cuanto a su relación con el caudal, Iroumé (1990) indica que se desarrolla según la siguiente fórmula:

$$GSS = \alpha Q^\beta \quad (2.1)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  corresponden a parámetros que deben ser determinados según el río y lugar que se esté estudiando, y  $Q$  es el caudal registrado para el GSS correspondiente. Para obtener los parámetros de esta relación, se hace necesario tener un registro

histórico de datos, el cual es posible obtener de las estaciones sedimentológicas que estén disponibles. Cabe destacar que a pesar de que se puedan encontrar valores para estimar el GSS, los datos presentan una gran dispersión, con lo cual no necesariamente el valor obtenido por la regresión represente la realidad.

- **Gasto Sólido de Fondo:** Se encuentra formado por arenas, gravas, bolones y rocas; es decir, partículas que tienen un diámetro característico mayor que para el GSS. Dado esto, se tiene que el peso no es un componente por despreciar en el balance de fuerzas. Para el transporte de estos, se tienen tres modos (Niño, 2019):

**Deslizamiento:** Desplazamiento sin rotación donde se mantiene un contacto constante entre la partícula y el lecho (menos frecuente).

**Rotación:** Desplazamiento con rotación, donde al igual que en el caso anterior, se mantiene un contacto entre el lecho del río y el sedimento.

**Saltación:** Desplazamiento dado por una sucesión de choques entre la partícula y el lecho del río. Este mecanismo es gobernado por la acción de fuerzas hidrodinámicas, donde se transfiere el momentum en la dirección del flujo. Dentro de los mecanismos de transporte, es el más frecuente.

Dados los grandes tamaños que puede llegar a tener las partículas que conforman el GSF y la fuerza que pueden llegar a obtener, las mediciones en terreno son mucho más complejas que la medición del GSS. Un instrumento de medición corresponde al geófono, instrumento que mide las vibraciones en una placa de acero dado el impacto que tiene ésta última con las partículas. La dificultad asociada a este instrumento corresponde a la calibración en terreno que se debe realizar, dado lo costosa y exhaustiva que es, a lo que Wyss et al. (2016) proponen la realización de canales artificiales que reproduzcan las condiciones tanto del flujo como de las partículas que transporta el río para calibrar el geófono. Dado las pocas estaciones que presentan este instrumento (alrededor de 20 en el año 2016), varios son los estudios que se han realizados para estimar el gasto sólido de fondo, donde las relaciones obtenidas por lo general se realizan en experimentos de laboratorio (Wyss et al., 2016). Cabe destacar que, las relaciones obtenidas de forma empírica hacen uso de parámetros adimensionales, correspondientes a los siguientes:

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{gRd_s^3}} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (2.3)$$

donde  $\rho_s$  y  $\rho$  corresponden a la densidad del sólido y del agua respectivamente.  $q_s$  y  $q_s^*$  son el gasto sólido volumétrico por unidad de ancho y el gasto sólido volumétrico adimensional. Además,  $d_s$  corresponde al diámetro característico del sedimento del río y  $R$  es la densidad relativa sumergida de los sedimentos.

Teniendo en cuenta lo anterior, varios autores han propuesto diversas fórmulas para llegar a estimar el valor del GSF. Algunas de estas relaciones corresponden a las siguientes:

**Meyer-Peter y Müller (1948):**

$$q_s^* = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}} \quad (2.4)$$

**Ashida y Michiue (1972):**

$$q_s^* = 17(\tau_* - \tau_{*c}) \left( \tau_*^{\frac{1}{2}} - \tau_{*c}^{\frac{1}{2}} \right) \quad (2.5)$$

**Fernández-Luque y van Beek (1976):**

$$q_s^* = 5.7(\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}} \quad (2.6)$$

**Engelund y Fredsoe (1976):**

$$q_s^* = 18.74(\tau_* - \tau_{*c}) \left( \tau_*^{\frac{1}{2}} - 0.7 \cdot \tau_{*c}^{\frac{1}{2}} \right) \quad (2.7)$$

donde  $\tau_*$  indica el esfuerzo de corte adimensional de fondo, que se encuentra dado por lo siguiente:

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{gRd_s} \quad (2.8)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.9)$$

$$\tau_0 = \gamma H \sin \alpha \quad (2.10)$$

Siendo  $\tau_0$  el esfuerzo de corte que actúa en el fondo del lecho. Además,  $\tau_{*c}$  indica el umbral de arrastre del sedimento, donde este último varía dependiendo de la ecuación a utilizar, puesto que los mismos autores proponen valores de 0.048, 0.05, entre 0.05 y 0.058, y 0.05 para caso expuesto respectivamente.



### **2.2.2.- Aportes del Gasto sólido.**

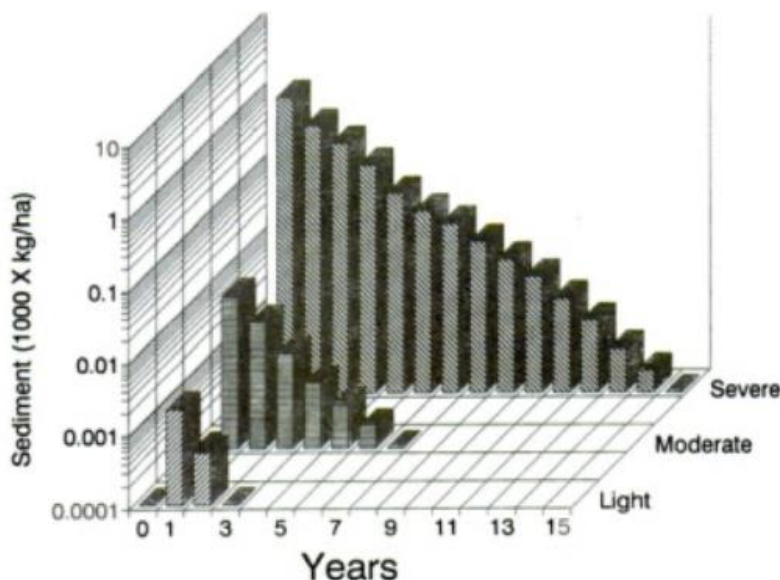
Como se expresó anteriormente, existen diferentes fuentes de gasto sólido, teniendo este tanto un origen natural como un origen antropogénico. Respecto a esta última, se genera por la liberación de partículas en procesos industriales, los cuales finalmente llegan a terminar en algún cauce. Esto puede ser tanto en el largo como corto plazo, puesto que puede ocurrir un evento de precipitación que mejore la calidad del aire, llevando los sedimentos suspendidos en el aire al río dado el drenaje que se tiene, o puede ser transportado hacia las montañas, donde luego se produce una precipitación, dejando estos sedimentos en la nieve, que después al derretirse provocan un impacto en los sedimentos del río. (Kang et. al., 2020)

En cuanto a aportes naturales, Gomi et al. (2005) indican que, en pequeñas cuencas, fuentes del gasto sólido suspendido se pueden dividir en dos, contribuciones externas e internas al flujo del río. Por parte de las contribuciones externas, se tienen entre ellos el desgaste de las orillas, erosión en la superficie de las laderas y erosión del suelo debido a glaciares, mientras que contribuciones internas corresponden a ríos efímeros y perenes.

Además, como fuente de sedimentos, se tiene el lavado de la cuenca, que corresponde a la tasa de sedimentos que se transporta debido a las precipitaciones líquidas que se producen en la zona. En este contexto, Julien (2002) indica una forma para estimar la producción de sedimentos en la cuenca dado este lavado, en donde se incluyen diferentes parámetros, tales como el área de la cuenca, un factor de corrección por el tamaño, la precipitación promedio en un periodo de tiempo, factores topográficos y por el uso de suelo. Dado esto, se aprecia que para determinar el lavado de la cuenca se hacen necesarias diferentes variables, las cuales varían de cuenca en cuenca, por lo que no es posible estimar un valor fijo para su cálculo.

Siguiendo con el lavado de cuenca, Wischmeier y Smith (1978) estiman las pérdidas del suelo por erosión dados diferentes factores de la cuenca, dentro de los que se encuentran la precipitación, vegetación, tipo de suelo y factores topográficos. Cabe destacar que, la fórmula que proponen es conocida como la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE), la cual ha sido utilizada ampliamente dada la simplicidad para el estudio de la erosión.

Otra fuente de sedimentos que no es frecuente y que tiene que ver con el lavado de la cuenca, corresponde a los incendios forestales, ya que con la quema de los árboles se producen residuos que quedan en el suelo, además de que el porcentaje de uso de suelo disminuye, con lo que existe un cambio en varios parámetros para obtener la cantidad de sedimentos que se incorporarán al cauce según la metodología de Julien (2002) o Wischmeier y Smith (1978). Considerando esto, DeBano et al. (1996) estudiaron la influencia que tienen los incendios forestales en el incremento de los sedimentos, llegando a la Figura 2.5:



**Figura 2.5: Incremento Promedio de Sedimentos en el tiempo bajo diferentes intensidades de incendios forestales (Fuente: DeBano et al., 1996).**

Como es apreciable en la Figura 2.5, se tiene que mientras mayor sea la intensidad del incendio forestal, mayor será la tasa de aumento en cuanto a la producción de sedimentos. Además, se puede ver que el efecto del incremento se mantiene en el tiempo.

Otro aspecto importante a tener en cuenta con el aporte de sólidos corresponde al fenómeno de “El Niño” y “La Niña”, los cuales son asociados a los períodos húmedos y secos respectivamente. En la investigación de Inman y Jenkins, en el año 1999, al estudiar ríos de la zona de California, comparando la data reportada de flujo de sedimentos con los fenómenos de El Niño y La Niña, encontraron que para el primero de estos, la media anual de sedimentos es 5 veces mayor que para períodos donde se hacía presente La Niña.

### 2.2.3.- Mediciones del Gasto Sólido Suspendido.

Para el muestreo del gasto sólido en suspensión se tienen dos posibilidades, las cuales corresponden a un muestreo rutinario, que son muestreos superficiales diarios, o un muestreo integrado, que concierne la columna de agua en su totalidad. (Menaes y López, 2012)

- **Muestreo rutinario:** Medición diaria superficial. Para obtener este, se toma una muestra en la sección de aforo y luego se lleva a laboratorio para analizarla.
- **Muestreo integrado:** Medición que en lo posible se realiza mensualmente y que abarca toda la columna de agua, de forma que la medición es más exacta con respecto a la anterior. Para la obtención de esta, se pueden realizar dos métodos, correspondientes a un muestreo puntual a diferentes profundidades o un llenado continuo de la botella que toma la muestra tanto en la dirección de descenso y ascenso de esta. Cabe destacar que en los ríos chilenos, para la obtención del muestreo integrado, por lo general se utiliza la última técnica descrita (DGA, 1999).

### **2.3.- Estimación Gasto Sólido a Futuro en el Mundo.**

A nivel mundial, se han realizado diversos estudios correspondientes a la estimación del transporte de sedimentos aplicando el cambio climático. Estos por lo general incluyen proyecciones sobre caudales o variables meteorológicas para poder obtener valores a futuro del transporte de sedimentos, puesto que, como fue expuesto en secciones anteriores, existe una dependencia del caudal del río para poder determinar valores del gasto sólido.

Ya en el año 2003, Walling & Fang estudiaron cambios en el transporte de sedimentos en suspensión de diferentes ríos, donde obtuvieron que en Ucrania, en el río Dnestr, existió un aumento en la tasa de sedimentos. Esto lo atribuyen a la deforestación que se generó en la zona, con lo cual se aumentó la capacidad de la cuenca en producir sedimentos, ya que no existía la cobertura vegetal que protegía el suelo de la erosión por las precipitaciones. Con esto se puede indicar que, para una estimación correcta, no solo es necesario tener indicadores respecto al cambio climático, sino que además se debe evaluar el posible crecimiento que tendrá la población y cómo afectará esta al entorno.

En cuanto a estudios más recientes, en China se tiene constancia de dos, donde se presentan 2 situaciones. En el primero de ellos, Zhou et al. (2017) estudia la variación del transporte de sedimentos en cuencas que presentan una latitud alta, donde obtuvieron que, ante el cambio climático, tanto la escorrentía como la tasa de sedimentos aumentarán. Este resultado además fue obtenido por un estudio en Canadá, específicamente en el trabajo de Dibike et al. (2018), donde la latitud de la cuenca en estudio también era alta.

En cuanto al segundo estudio, este fue realizado en el año 2013 por Lu et al., obteniendo resultados contrarios al anterior, donde tanto el caudal como el transporte de sedimentos tuvo una reducción.

### **2.4.- Hipótesis del Trabajo.**

Mediante el análisis de datos de las estaciones sedimentométricas, métodos de cantidad de sedimentos que se aporta dado el lavado de cuenca que ocurre por las precipitaciones y relaciones de gasto sólido de fondo, es posible estimar el cambio en la tasa de sedimentos que traerán los ríos de la zona centro-sur del país para escenarios futuros, dado el efecto del cambio climático, el cual puede aumentar o disminuir, lo cual se encuentra dado por la magnitud del cambio en la zona.

### **2.5.- Conclusiones.**

Como principales conclusiones, se tienen las siguientes:

- Como aportantes de los sedimentos en los ríos se tienen diferentes fuentes, los cuales tienen un origen tanto antropogénico, como natural. Las diversas fuentes no presentan una misma magnitud de aporte de sedimentos, además de que algunas pueden variar con el tiempo, tales como los incendios forestales y la producción de sedimentos por procesos industriales.

- Una fuente de sedimentos importantes a analizar con el efecto del cambio climático corresponde al lavado de cuenca, dado que al variar las precipitaciones, este también cambiará, lo que hace interesante el análisis de esta variable.
- Ya existen estudios que hablan acerca del cambio en la tasa de los sedimentos en los ríos, lo cual es un indicio de que analizar esta variable es un aspecto importante para los ríos, especialmente para ver el comportamiento en la evolución que tiene el río en su morfología, al igual que para analizar la seguridad de obras que estén sobre ríos.

## Capítulo 3 : Zonas de Estudio.

Las zonas por estudiar corresponden a tres cuencas distribuidas entre la zona centro-sur del país, abarcando cuatro regiones del país, la Región de O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío. Respecto a las cuencas, estas corresponden a: Río Tinguiririca Bajo Los Briones, Río Loncomilla en Las Brisas y Río Itata en Coelemu (Figura 3.1), las cuales se encuentran delimitadas por estaciones fluviométricas que comparten el nombre.

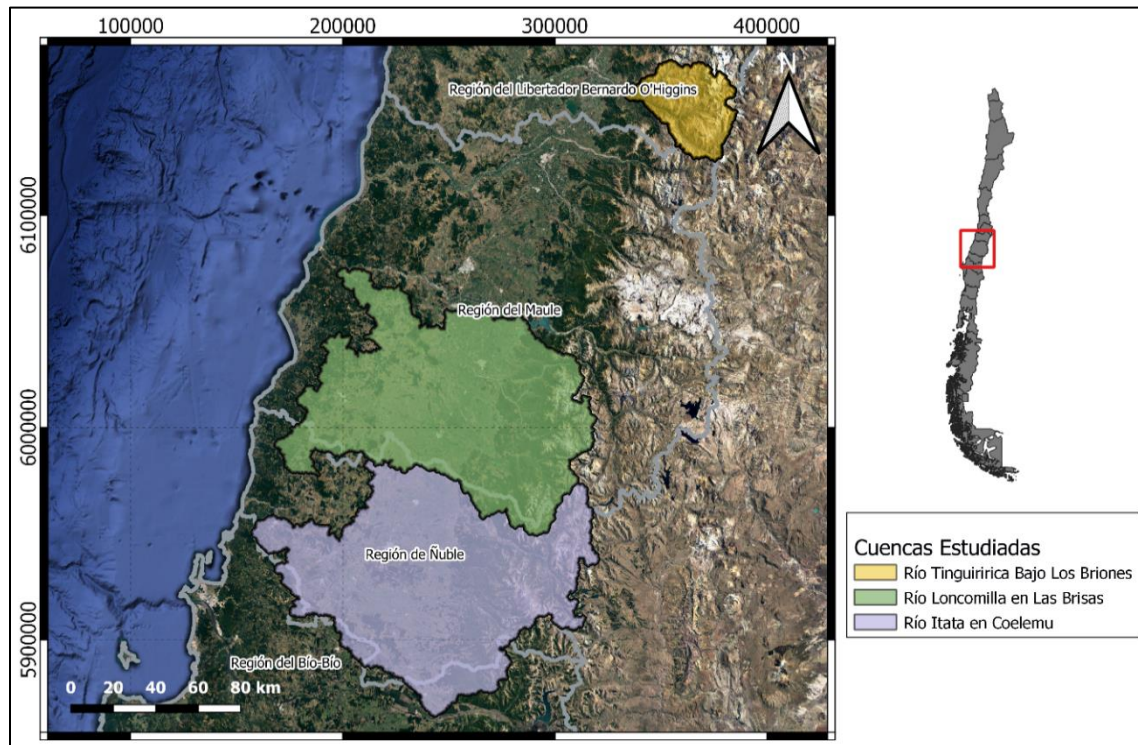


Figura 3.1: Ubicación de Cuencas en estudio.

### 3.1.- Antecedentes Generales Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

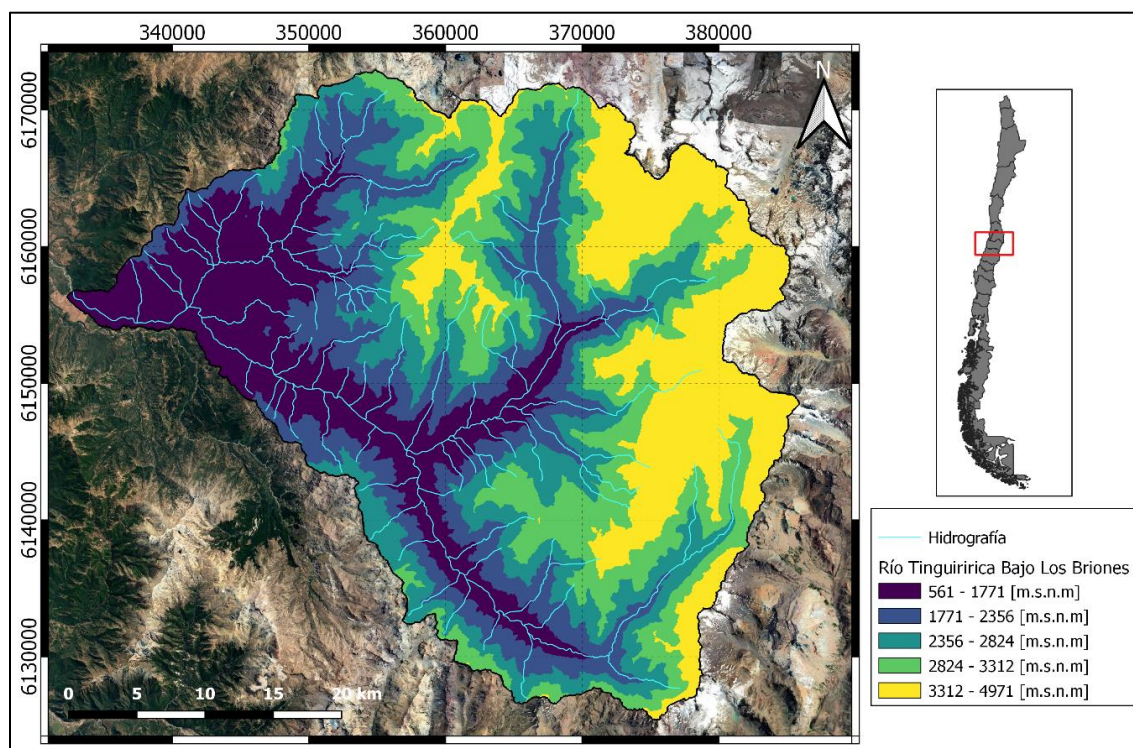
El río Tinguiririca nace en la Cordillera de los Andes, como consecuencia de la confluencia del río Las Damas y Azufre. A este se le une en su trayecto el río Claro de Rengo y el estero Chimbarongo (el cual es uno de sus afluentes más importantes), donde finalmente se termina uniendo al Cachapoal para llegar al embalse Rapel. En cuanto a su longitud, si se considera el río Azufre, el río Tinguiririca recorre una distancia de 167 [km], drenando un área de 4,730 [km<sup>2</sup>]. (DGA, 2004b).

La cuenca “Río Tinguiririca Bajo Los Briones” es parte de la cuenca del río Tinguiririca, la cual está ubicada en la Región del Libertador Bernardo O’Higgins, limitada en el sur por la Región del Maule y en el norte por la cuenca del río Cachapoal. Este último, al igual que el río Tinguiririca, corresponde a uno de los principales afluentes del embalse Rapel.

La cuenca en estudio se encuentra en la parte alta del río Tinguiririca, antes de la junta con el río Claro, drenando en total un área de 1,438 [km<sup>2</sup>]. Al ubicarse en la alta montaña (Figura 3.2), se presentan elevaciones importantes, las cuales llegan hasta los 4,971 [m.s.n.m].

Otro factor importante dada la ubicación geográfica de la cuenca, corresponde a los glaciares, donde en esta cuenca se tiene al Glaciar Universidad, el cual es uno de los más grandes de la zona central del país, dado que presenta una superficie de aproximadamente 27 [km<sup>2</sup>]. Éste, entre los años 1945 y 2011, ha presentado un retroceso de 1.99 [km<sup>2</sup>], lo que corresponde a una pérdida promedio de 0.03 [km<sup>2</sup>] por año (DGA, 2014b).

La cuenca, según el mapa Köppen-Geiger de clasificación climática realizado por Sarricolea et. al. (2017), indica que existen 2 tipos de climas, siendo estos el clima mediterráneo y el de tundra, donde este último se presenta para altitudes mayores a 2824 [m.s.n.m]. (Figura 3.2).



**Figura 3.2: Cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.**

El régimen de la cuenca corresponde al tipo nivo-pluvial, lo cual es esperable dado que se encuentra en la alta montaña. En la Figura 3.3, es posible ver que los mayores caudales se tienen en los meses de verano, específicamente en los meses de diciembre y enero. Además de que se aprecia la componente pluvial, dado que se vuelve a tener un peak de caudales en junio y julio.

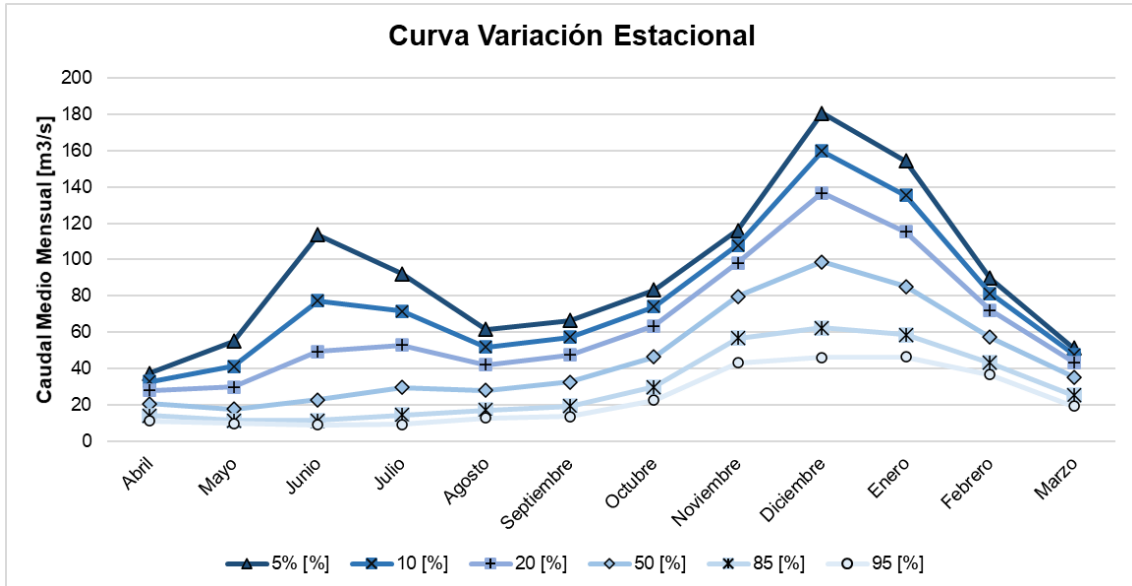


Figura 3.3: Curva Variación Estacional Río Tinguiririca Bajo Los Briones (Fuente: Modificado DGA, 2004b).

Respecto a la información que se puede tener de la cuenca, se tienen diversos tipos de estaciones, entre las cuales existen reportes de caudales diarios, reportes meteorológicos y de sedimentos. A continuación, en la Figura 3.4, se presenta la ubicación de las estaciones meteorológicas presentes en la zona.

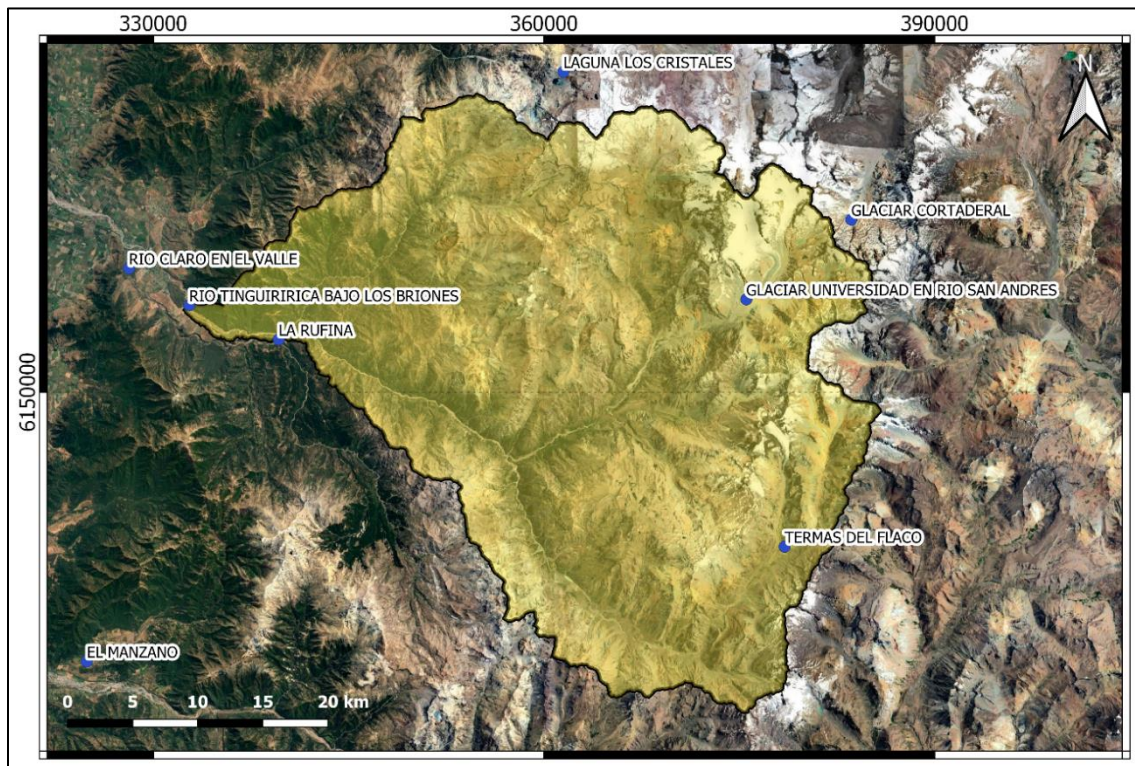


Figura 3.4: Ubicación Estaciones de la Cuenca.

### **3.2.- Antecedentes Generales Río Loncomilla en Las Brisas.**

En la Región del Maule se tienen dos importantes ríos, correspondientes al Mataquito y al Maule, los cuales nacen en la Cordillera de Los Andes y desembocan en el Océano Pacífico. El río Loncomilla corresponde a uno de los afluentes más importantes del río Maule, donde la confluencia ocurre pocos kilómetros luego de la ciudad de San Javier.

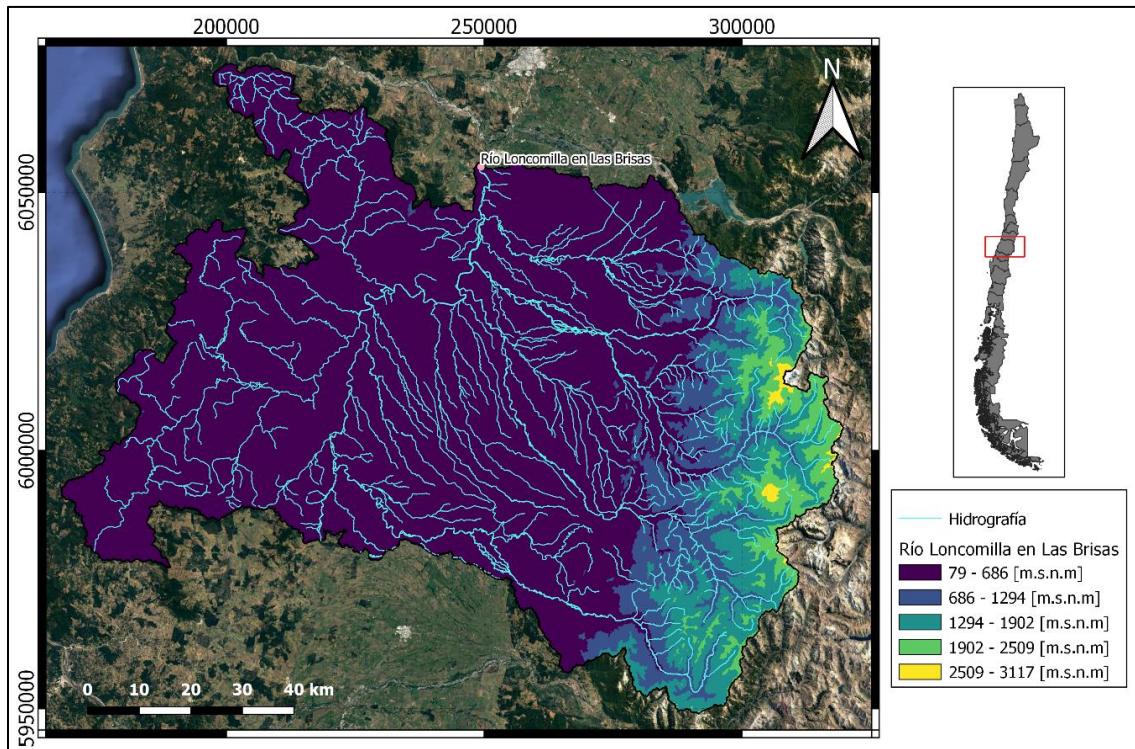
El río Loncomilla debe su nacimiento a la confluencia de los ríos Longaví y Perquilauquén, los cuales vienen desde el oriente y el sur respectivamente. Al Loncomilla, en su trayecto, se le une el río Achibueno y el Putagán, además de varios esteros que pertenecen a la cuenca. Respecto a la longitud del cauce, el río Loncomilla desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Maule, consta de un largo de 65 [km], abarcando en total una superficie de 10,439 [km<sup>2</sup>] (DGA, 2005).

La cuenca seleccionada corresponde a “Río Loncomilla en Las Brisas”, la cual se encuentra delimitada por la estación fluviométrica y sedimentométrica con la que comparte el nombre, en donde la estación se ubica poco antes de la desembocadura del río Loncomilla. La cuenca, en su mayoría, se encuentra en la Región del Maule, ya que existe una pequeña zona que está en la Región de Ñuble. Esta limita por el norte con la cuenca del río Maule hasta antes de la confluencia, por el este se encuentra el límite internacional con Argentina, mientras que por el sur con la cuenca del río Itata, ubicado en la región de Ñuble y parte del Biobío.

En cuanto a la cuenca en estudio, esta tiene una superficie de drenaje 9,924 [km<sup>2</sup>], lo cual corresponde a casi toda la cuenca del Loncomilla. Esta cuenca se presenta tanto en el valle de la Región del Maule, la Cordillera de Los Andes y Cordillera de la Costa. (Figura 3.5).

Respecto al clima de la cuenca, utilizando el mapa Köppen-Geiger realizado por Sarricolea et. al. (2017), y sabiendo que en su mayoría la cuenca se encuentra en el valle, esta presenta en su gran mayoría un clima mediterráneo, donde existe una pequeña área que presenta un clima de tundra, el cual se asocia a la presencia de hielos perpetuos y del volcán Nevados de Longaví.





**Figura 3.5: Cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.**

En la Figura 3.6 se aprecia la curva de variación estacional para la cuenca, en donde se tiene que el régimen para esta corresponde a un tipo pluvial. De esta figura también se puede ver que los caudales máximos se tienen en los meses de junio, julio y agosto, mientras que los mínimos se presentan en los meses de verano. Además, se tiene que la diferencia de caudales entre un período y otro es bastante fuerte, ya que para la curva de una probabilidad de excedencia de 5 [%], el caudal máximo, que se presenta en el mes de junio, tiene un valor cercano a los 1,660 [m<sup>3</sup>/s], mientras que el menor se presenta el mes de enero con 64 [m<sup>3</sup>/s], lo cual es cerca del 4 [%] con respecto al caudal de junio.

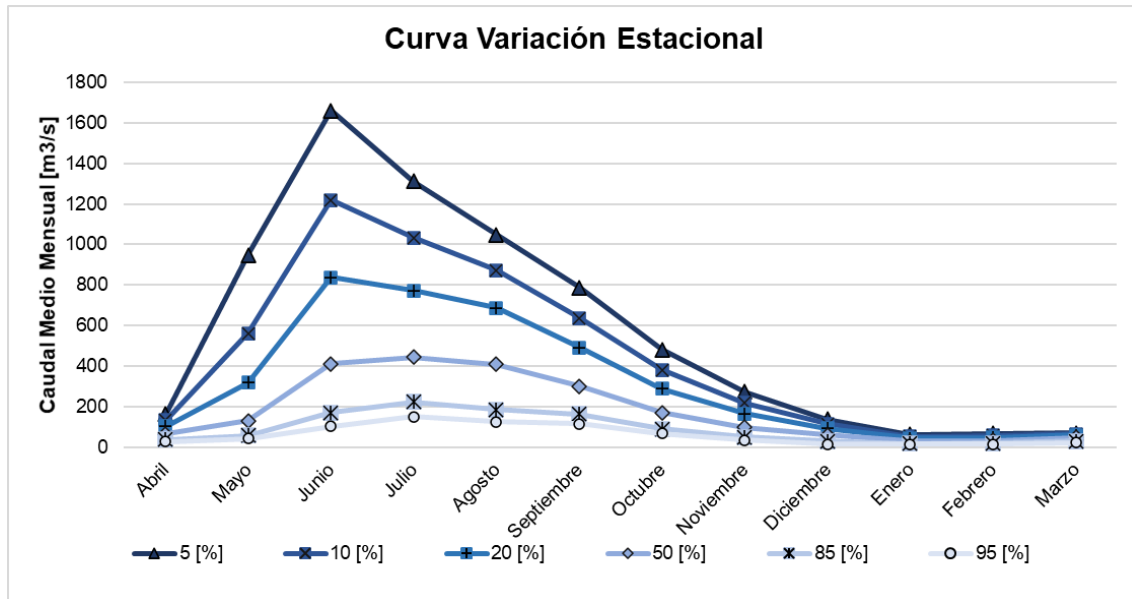


Figura 3.6: Curva Variación Estacional Río Loncomilla en Las Brisas (Fuente: Elaboración Propia con datos de la DGA).

En cuanto a estaciones de la DGA, dado que es una cuenca que abarca una gran cantidad de superficie, se tienen varias estaciones de diferentes tipos, con lo cual no existe déficit de información respecto a la escala espacial. En la Figura 3.7 es posible apreciar la cantidad de estaciones que hay, tanto dentro de la cuenca como en las cercanías de esta.

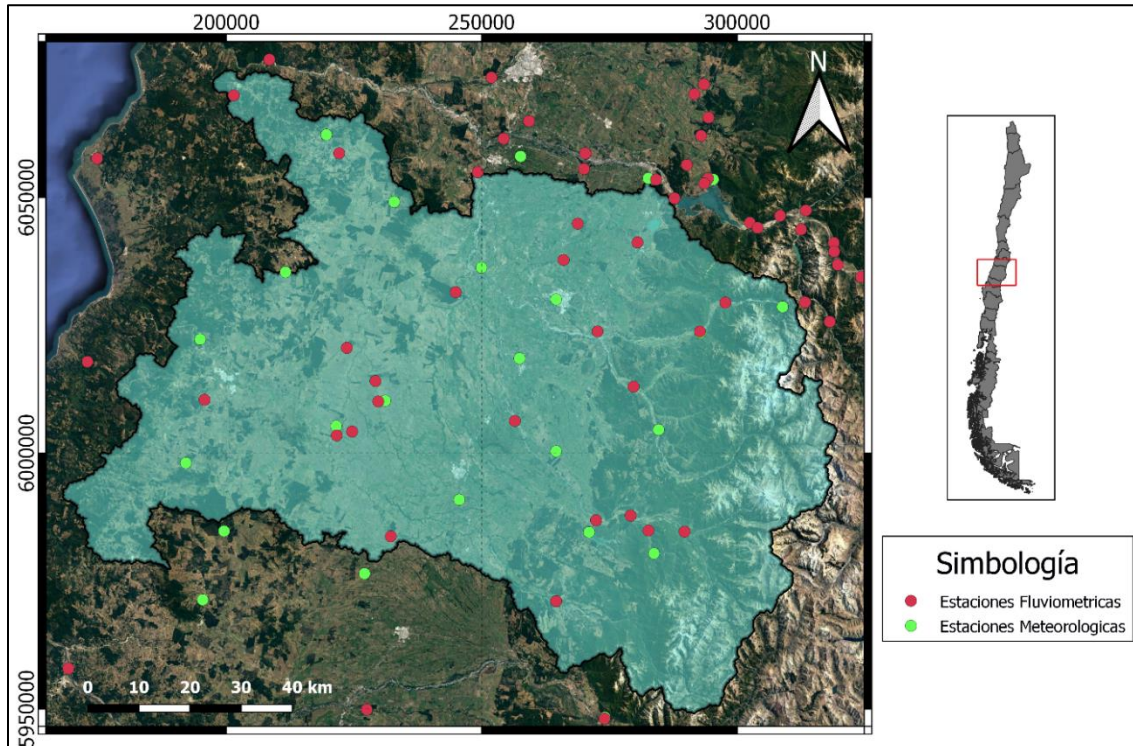


Figura 3.7: Ubicación Estaciones de la Cuenca.

### **3.3.- Antecedentes Generales Río Itata en Coelemu.**

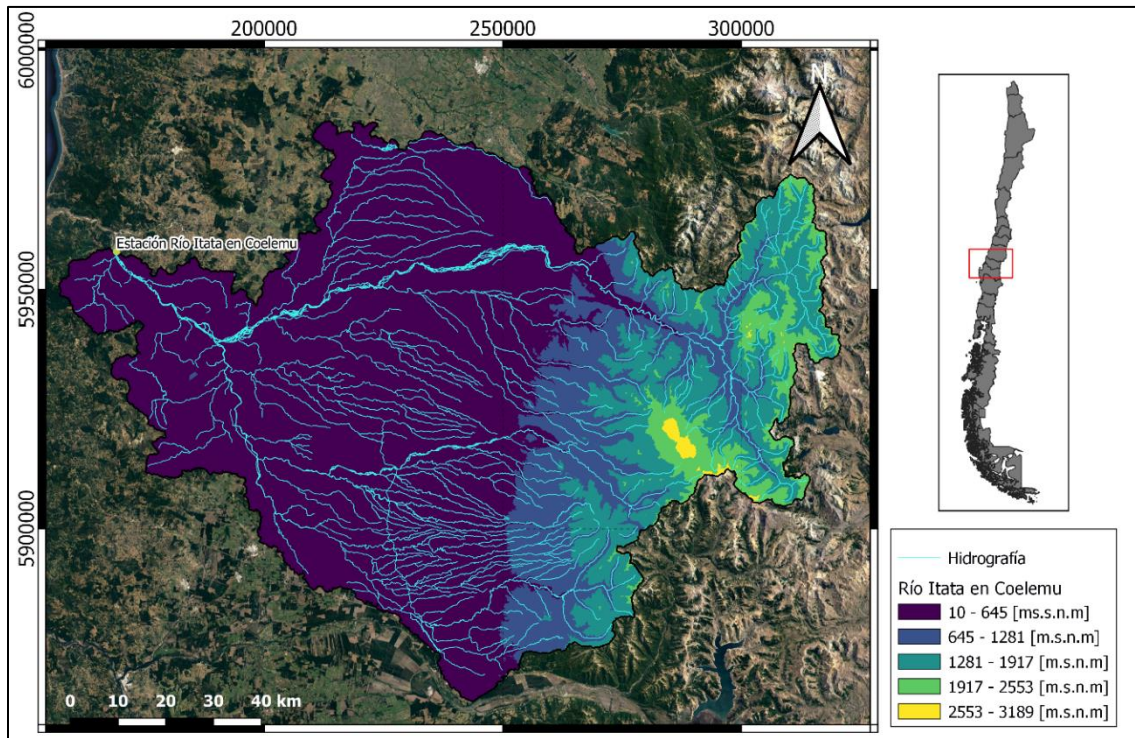
El río Itata nace por la confluencia del río Cholguán y el Huépil, los cuales vienen desde el oriente y sur, respectivamente. El punto de unión de los ríos mencionados se ubica a pocos kilómetros al norte de la ribera norte del río Laja. Dentro de los efluentes que tiene el río Itata, se encuentra el río Ñuble, el cual es el aporte más importante. Además, antes de la junta del Itata con el Ñuble, se une el río Diguillín, Danicalqui y Larqui, con lo que la cuenca del río Itata abarca un área de 11,294 [km<sup>2</sup>] (DGA, 2004a).

La cuenca “Río Itata en Coelemu” corresponde a una subcuenca del río Itata, la cual se encuentra en la Región de Ñuble y parte de la Región del Biobío. La cuenca del río Itata se encuentra delimitada en el norte por la cuenca del Maule, en el oeste por el Océano Pacífico (donde realiza su desembocadura), mientras que por el este se encuentra la frontera con Argentina.

La cuenca en estudio se encuentra delimitada por la estación fluviométrica y sedimentométrica del mismo nombre, la que se ubica alrededor de 5 [km] aguas arriba de la junta del río Itata con el río Lonquén, confluencia que está ubicada a pocos kilómetros antes de la desembocadura del río Itata en el Océano Pacífico. En cuanto a superficie, la cuenca seleccionada abarca en total 10,402 [km<sup>2</sup>], siendo casi el total de la cuenca del río Itata.

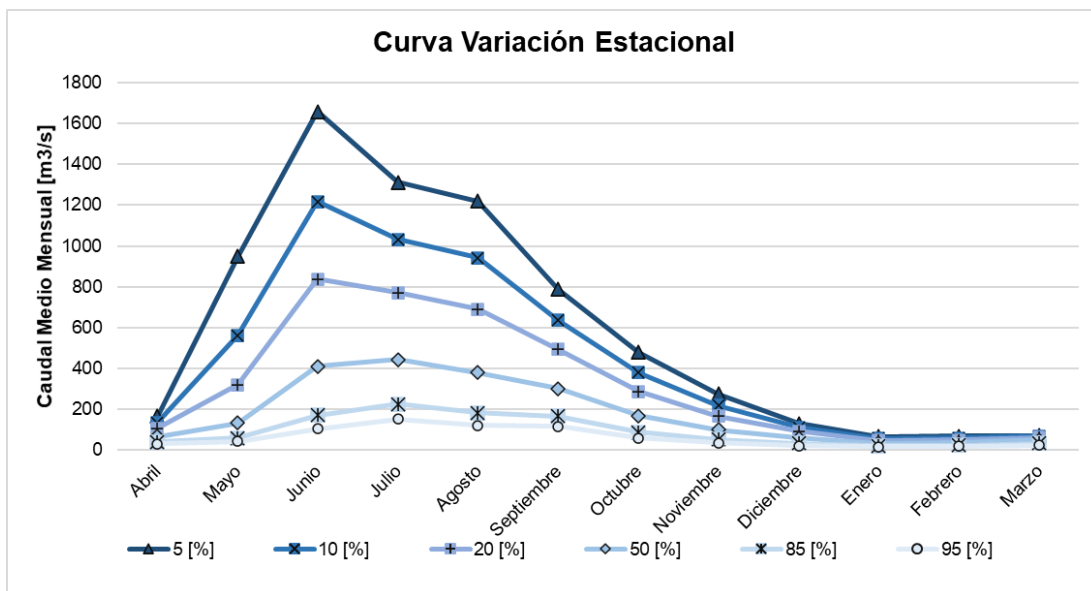
Al igual que la cuenca “Río Loncomilla en Las Brisas”, “Río Itata en Coelemu” presenta tanto superficie en el valle de la región como una parte en la montaña. En la montaña se ubica el complejo volcánico Nevados de Chillán y el volcán Chillán (Figura 3.8), del cual nacen los dos afluentes más importantes para esta cuenca, siendo estos el río Ñuble y Diguillín, respectivamente.

En cuanto al clima, dada la información del mapa Köppen-Geiger realizado por Sarricolea et. al. (2017), se tiene que en la cuenca en estudio se presentan dos climas, el mediterráneo y el de tundra, donde el último se encuentra asociado a la presencia de los volcanes, por la alta altitud que presentan.



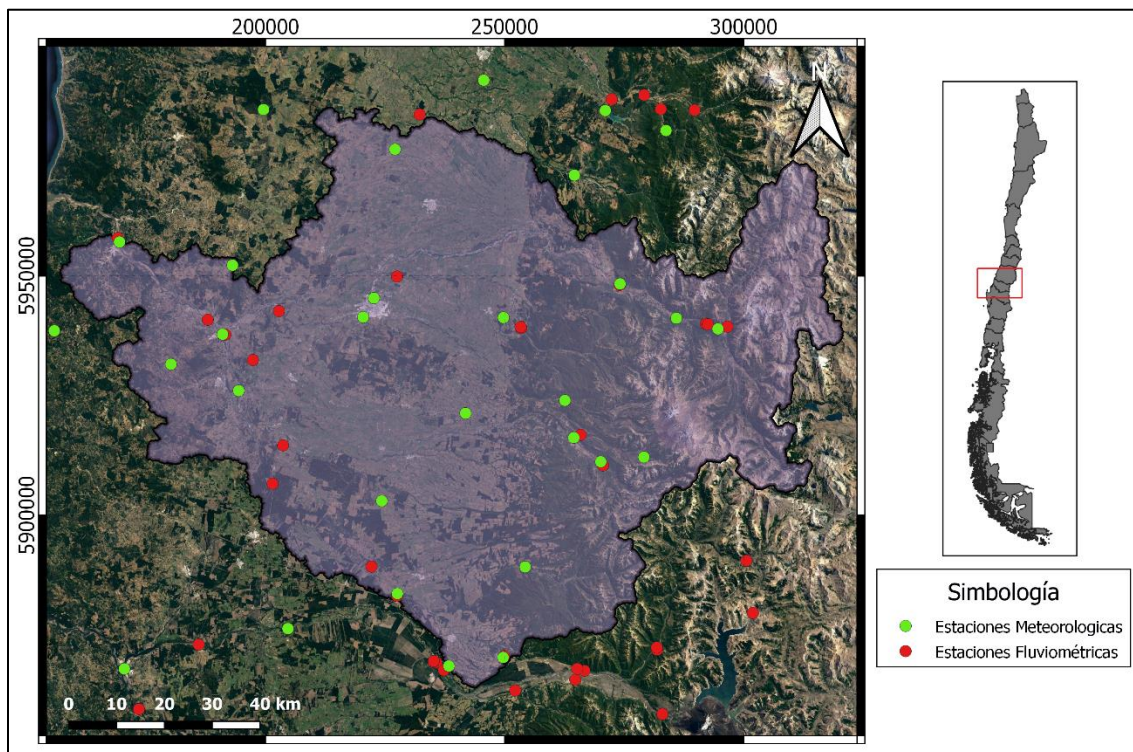
**Figura 3.8: Cuenca Río Itata en Coelemu.**

Respecto al régimen de la cuenca, en la Figura 3.9 se aprecia que esta presenta uno del tipo pluvial, presentándose los tres mayores caudales en la cuenca (para una probabilidad de excedencia del 5 [%]) en los meses de junio, julio y agosto, mientras que los caudales mínimos se tienen en el período estival, siendo estos aproximadamente un 4 [%] del caudal máximo que se aprecia en junio.



**Figura 3.9: Curva Variación Estacional Río Itata en Coelemu** (Fuente: Elaboración Propia con datos de la DGA).

Respecto a las estaciones, dado que es una gran cuenca, se tienen muchas estaciones dentro de ella, al igual que a sus alrededores. Estas estaciones son de diferentes tipos, por ejemplo, la estación “Río Itata en Coelemu” corresponde a una estación fluviométrica, sedimentométrica y meteorológica. En la Figura 3.10, se pueden apreciar tanto las estaciones fluviométricas como meteorológicas para la cuenca.



**Figura 3.10: Ubicación Estaciones de la Cuenca.**

## Capítulo 4 : Metodología y Recopilación de Datos.

El presente capítulo se centra en la metodología empleada y la recopilación de datos necesaria para obtener tanto la estimación del gasto sólido suspendido (GSS) a través de las estaciones de la DGA, la implementación del método RUSLE y la obtención de gasto sólido de fondo (GSF).

### 4.1.- Selección de Cuencas.

La selección de cuencas para el estudio se debe a dos factores:

1. Analizar el período de registro de las estaciones sedimentométricas de la zona centro-sur, donde las características importantes son que las estaciones sigan vigentes y tengan los suficientes datos para realizar una regresión.
2. Encontrar estudios que involucren proyecciones de caudales o la variación de estos dado el efecto del cambio climático, donde las cuencas sean delimitadas por estaciones fluviométricas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza una búsqueda por distintos repositorios electrónicos en busca de memorias o tesis que tenga proyecciones de caudales o variaciones de estos, en donde si bien existen, el principal problema se encuentra es el hecho de que las modelaciones son realizadas para escenarios climáticos distintos o con distintas simulaciones climáticas globales (GCM, por sus siglas en inglés).

Considerando el motivo anterior, las cuencas seleccionadas corresponden a las presentadas en el capítulo anterior, las cuales son Río Tinguiririca Bajo Los Briones, Río Loncomilla en Las Brisas y Río Itata en Coelemu, dado que se tenían las estadísticas sedimentométricas de estas estaciones.

### 4.2.- Estimación Caudal a Futuro.

Para obtener los caudales asociados al escenario futuro, considerando el efecto del cambio climático, en el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5, se utilizan los resultados proporcionados por el proyecto CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment en inglés), los cuales pueden encontrarse en la página de simulaciones climáticas del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia<sup>1</sup> (CR2 desde ahora).

El proyecto CORDEX presenta simulaciones a un nivel regional, es decir, presenta simulaciones en un área limitada, con lo cual provee información más detallada en cuanto al cambio climático al compararlo con un modelo que presenta simulaciones globales. En este caso, las simulaciones entregadas por CORDEX para el escenario RCP 2.6 utiliza una cantidad de tres modelos regionales, mientras que para el escenario RCP 8.5 utiliza cinco. (CR2, 2021).

---

<sup>1</sup> <https://simulaciones.cr2.cl/>

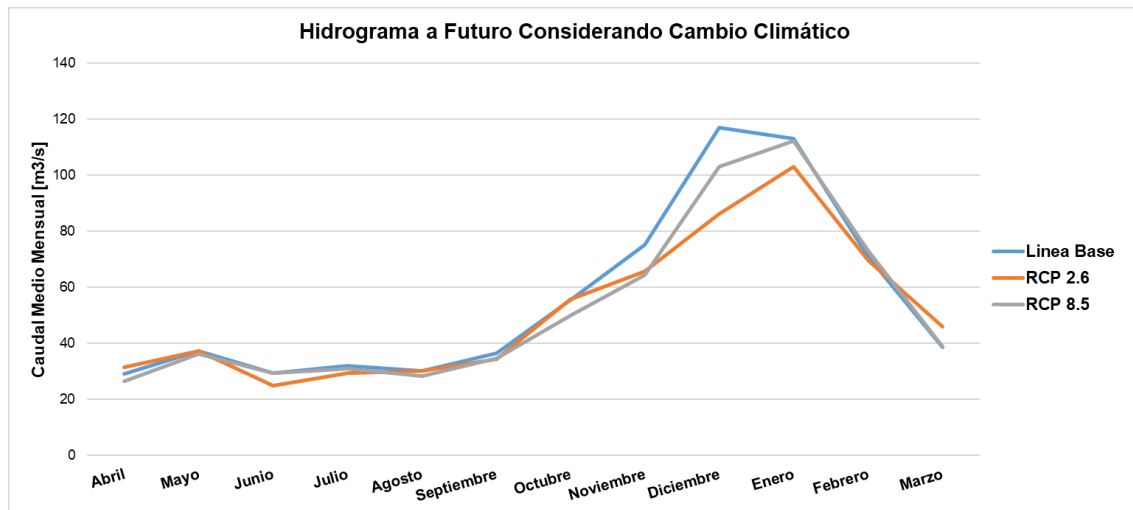
Respecto a las variaciones tanto de la precipitación como de la temperatura obtenidas en cada una de las cuencas, corresponden a las siguientes.

**Tabla 4.1: Variación promedio anual de temperatura y precipitación por CORDEX para el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5.**

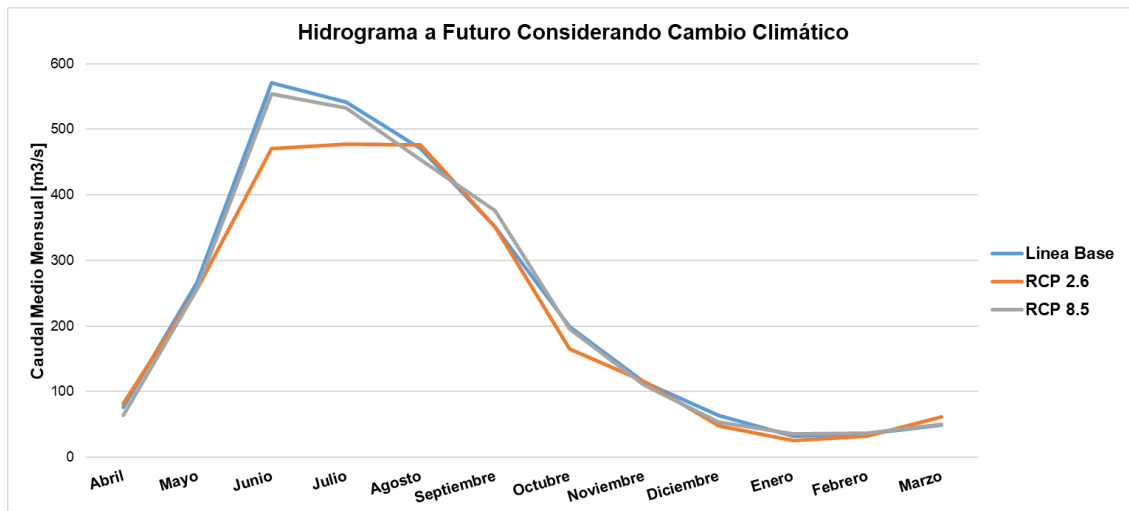
	RCP 2.6		RCP 8.5	
	Precipitación [%]	Temperatura [°C]	Precipitación [%]	Temperatura [°C]
Tinguiririca	0.17	0.27	-0.1	0.81
Loncomilla	-0.1	0.21	-1.24	0.65
Itata	-0.65	0.20	-1.33	0.66

Como se aprecia en la Tabla 4.1, se ve que las reducciones de las precipitaciones son casi nulas con respecto a la actualidad. Esto se debe a que corresponde al promedio anual, puesto que si se ven los resultados mes a mes, es posible ver que existen variaciones fuertes, especialmente en el verano, donde las precipitaciones aumentan.

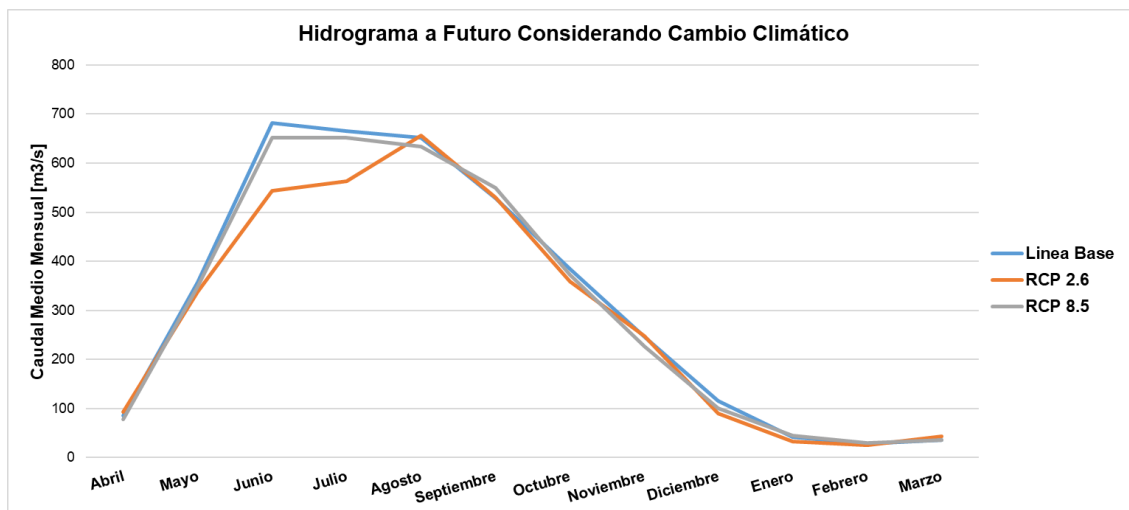
Para obtener el caudal, se hace uso de los datos descargados asociados a esta variable, con lo que se obtienen las siguientes simulaciones de caudales.



**Figura 4.1: Hidrograma futuro para Río Tinguiririca Bajo Los Briones bajo el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5 en el periodo 2030 – 2060.**



**Figura 4.2: Hidrograma futuro para Río Loncomilla en Las Brisas bajo el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5 en el periodo 2030 – 2060.**



**Figura 4.3: Hidrograma futuro para Río Itata en Coelemu bajo el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5 en el periodo 2030 – 2060.**

Como se aprecia en las Figura 4.1, 4.2 y 4.3, en general se tiene una mayor disminución del caudal para el escenario RCP 2.6 que para el RCP 8.5. Esto último es posible explicar puesto que con el escenario RCP 2.6, el aumento de temperatura es menor, por lo cual si bien la línea de nieves retrocedería, esta no lo haría tanto como el escenario RCP 8.5. Con esto se tiene que el área pluvial aumentaría para ambos casos, pero en menor cantidad para el RCP 2.6, por lo que si bien hay menos caudal en este período futuro, se tendría aún nieve que pueda suplir el recurso en sequías intensas.

Otro punto importante es que en el escenario RCP 8.5 los eventos extremos aumentan, además de que la cantidad de precipitación caída en los meses de verano aumenta, razón por la que se tiene más caudal en este escenario que en comparación con el RCP 2.6.



Por parte de las disminuciones del caudal, se tiene en promedio una reducción anual para el escenario RCP 2.6 (RCP 8.5) de un 7.59 (5.55), 7.56 (1.93) y 7.90 (2.72) [%] para la cuenca del río Tinguiririca, Loncomilla e Itata, respectivamente.

Como se apreció en las figuras anteriores, se tiene un peor resultado para el escenario RCP 2.6, pero en este trabajo se realizará una comparación entre ambos escenarios.

### 4.3.- Estadísticas Estaciones Sedimentométricas y Relaciones.

Respecto a las estadísticas del muestreo rutinario de las estaciones sedimentométricas, la data se baja directamente desde la página web de la DGA (Dirección General de Aguas), en donde se tienen reportes diarios de cuatro variables, correspondientes a la altura del agua, la concentración de sedimentos que lleva el río, el caudal de éste y el gasto sólido suspendido.

Las estaciones sedimentométricas utilizadas corresponden a estaciones en el punto de salida para cada una de las cuencas. En la Tabla 4.2 se presenta la cantidad de información que presenta cada estación, presentando cuanta información hay por año.

**Tabla 4.2: Cantidad de días con información por año.**

Cuenca	Año																
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Río Tinguiririca Bajo Los Briones	0	0	0	137	50	0	0	151	307	319	194	204	188	280	275	274	140
Río Loncomilla en Las Brisas	365	358	363	345	187	275	158	264	335	330	341	318	303	260	339	352	181
Río Itata en Coelemu	333	345	360	321	352	299	338	76	365	334	308	225	213	221	365	246	118

**Tabla 4.2: Cantidad de días con información por año. (Continuación)**

Cuenca	Año															
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Río Tinguiririca Bajo Los Briones	265	336	353	340	358	326	202	70	305	314	335	338	356	332	363	242
Río Loncomilla en Las Brisas	323	354	346	365	365	354	365	331	365	363	365	365	364	366	365	323
Río Itata en Coelemu	364	366	359	335	365	366	360	361	365	365	365	284	358	336	365	273

Como se puede ver en la Tabla 4.2, pese a que la DGA informa que se tienen datos inclusive para el año 2020, al realizar la descarga estos solo llegan hasta el año 2018, donde en este año no se presentan todos los datos. Un punto importante para tomar en cuenta es que, a pesar de descargar datos desde 1986 a 2019, para la cuenca del río Loncomilla y del Itata se tienen aproximadamente 30 años de datos, mientras que para el río Tinguiririca solo se cuenta con 20 años.

En cuanto al muestreo integrado, para obtener éste se hace necesario el realizar una solicitud de transparencia, donde los datos son entregados en un período de una a seis semanas. Al igual que en el muestreo rutinario, el archivo entregado tiene las mismas cuatro

variables, además de la fecha. La data por utilizar se encuentra entre los años 1986 y 2018, dado la limitación del muestreo rutinario.

Para trabajar con los datos obtenidos, en primer lugar se relaciona el muestreo rutinario junto con el caudal, para poder obtener una relación del tipo exponencial entre el GSS y el caudal. Luego, se relaciona la variable del GSS Rutinario con el GSS Integrado según el día en que fueron tomados los datos y se obtiene una relación lineal entre ambas variables.

#### 4.3.1.- Obtención Relaciones Gasto Sólido Suspendido y Caudal.

Tal como se aprecia en la fórmula 2.1, se tiene una relación exponencial entre el gasto sólido suspendido (GSS) y el caudal, donde los parámetros para cada una de estas se obtienen de la siguiente manera:

- Se obtiene el parámetro  $\beta$  de resolver la siguiente fórmula usando la herramienta “Solver” de *Excel*.

$$\frac{\sum Q_i^\beta G_{si}}{\sum Q_i^{2\beta}} = \frac{\sum Q_i^\beta \ln(Q_i) G_{si}}{Q_i^{2\beta} \ln \sum(Q_i)} \quad (4.1)$$

donde  $Q_i$  corresponde al caudal para el día  $i$  y  $G_{si}$  al gasto sólido suspendido asociado al  $Q_i$ .

- Luego, para obtener el valor de  $\alpha$ , se resuelve lo siguiente:

$$\alpha = \frac{\sum Q_i^\beta G_{si}}{\sum Q_i^{2\beta}} \quad (4.2)$$

- Finalmente, para obtener el valor  $R^2$  de la función creada, se utiliza la siguiente fórmula:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (G_{si} - G_{si}^e)^2}{\sum (G_{si} - \overline{G_s})^2} \quad (4.3)$$

donde  $G_{si}^e$  corresponde al valor estimado del GSS utilizando la regresión encontrada y  $\overline{G_s}$  es el promedio de las mediciones en terreno del GSS.

#### 4.4.- Método RUSLE/SDR.

Para determinar la cantidad de sedimentos que se trasladan desde la cuenca hacia el río dado por el lavado de la cuenca, se utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), la cual ha sido ampliamente utilizado para estimar la pérdida de suelo por erosión, puesto que permite una estimación rápida dada la simplicidad de éste (Bonilla et. al., 2010).

El método RUSLE es un estimativo de la erosión potencial que se tiene en la cuenca en cuanto al gasto sólido suspendido, el cual hace uso de la ecuación universal de pérdida de suelo, que se tiene por la fórmula de Wischmeier y Smith del año 1978:

$$A = R \cdot C \cdot L \cdot S \cdot K \cdot P \quad (4.4)$$

donde:

A [Ton/ha/año]: Pérdida de Suelo por la precipitación.

R [Mega Joule (MJ) mm/ha/h/año]: Factor de Erosividad de la precipitación.

C [-]: Factor dada la cobertura del suelo.

L [-]: Factor dado el largo de la ladera.

S [-]: Factor dada la pendiente de la ladera.

K [Ton h/MJ/mm]: Factor dada la Erodabilidad del suelo.

P [-]: Factor dada las técnicas de conservación del suelo.

Dado que se trabaja con cuencas, las cuales involucran una extensión de área, para implementar el método se debe trabajar con un software GIS, el cual en este caso corresponde al programa QGIS en su versión 3.10. Junto a este, se hace uso de varios archivos ráster, donde dependiendo del factor que se desee calcular, se usa un archivo de este tipo.

Otro factor importante corresponde a la Razón de Entrega de Sedimentos (SDR por sus siglas en inglés), el cual establece una relación entre la erosión bruta (obtenido a través de RUSLE) y la erosión neta, que corresponde a la cantidad de sedimentos que efectivamente llegan al cauce. A continuación, se presenta la Figura 4.4, la cual corresponde a un esquema del método RUSLE/SDR.

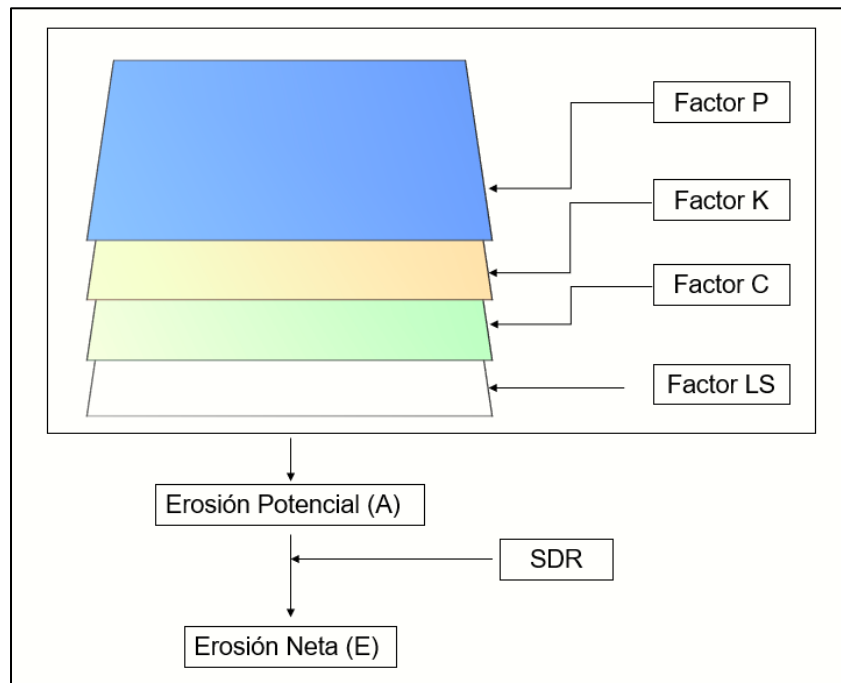


Figura 4.4: Esquema RUSLE/SDR.

El índice SDR se debe dado que en el curso del sedimento hacia el cauce pueden existir fenómenos que hacen que no toda la erosividad potencial llegue a éste, con lo cual solo una parte de los sedimentos se adiciona al río. Considerando este último, la erosión que finalmente se añade al río se tiene por la siguiente fórmula:

$$E = A \cdot SDR \quad (4.5)$$

donde:

E [Ton/ha/año]: Erosión neta de la cuenca.

A [Ton/ha/año]: Erosión potencial obtenida por RUSLE.

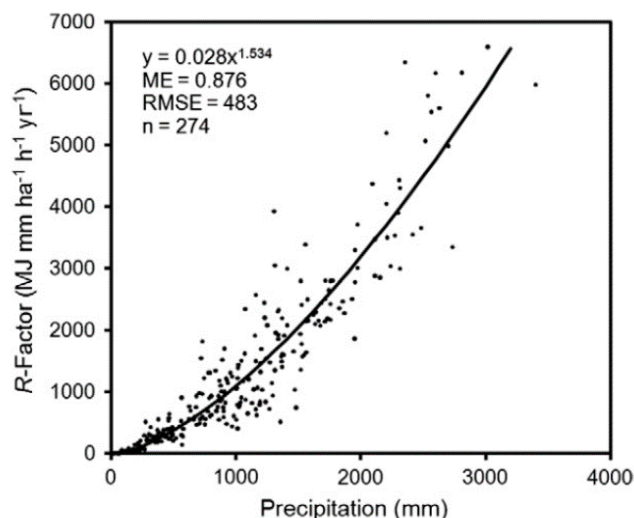
SDR [-]: Índice SDR.

#### **4.4.1.- Erosividad de la Lluvia (Factor R).**

El parámetro R consiste en medir la erosividad de las precipitaciones, la cual se produce por el impacto que tiene el agua con el suelo. Wischmeier y Smith (1978) indican que este parámetro debe cuantificar el efecto que tiene el impacto de la lluvia sobre el suelo, además de proporcionar información acerca de la escorrentía y asociar ésta con la precipitación.

Para obtener el factor R, Wischmeier y Smith (1978) presentan en su trabajo una forma de estimar éste, el cual considera dos elementos, la energía cinética (E) y la intensidad máxima en 30 minutos de la tormenta ( $I_{30}$ ). Dado que no siempre es posible obtener las intensidades de las tormentas, ya sea por una falla de la estación o porque no hay datos de la zona, es que diversos autores proponen otras relaciones para obtener R. Una de estas relaciones corresponde a la dada por el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) en el año 1988, la cual fue utilizada en el trabajo de Bonilla et al. (2010) para la estimación de la erosión hídrica en Santo Domingo, ubicado en la zona central de Chile. En el trabajo de ICONA (1988), el factor depende de un coeficiente dada la zona, la precipitación media anual y las intensidades de lluvia máxima en 1 y 24 horas para un período de retorno de dos años.

En el presente estudio, el valor de este parámetro se tiene por la fórmula desarrollada por Bonilla y Vidal (2011), la cual fue desarrollada para Chile central, específicamente desde la región de Valparaíso hasta la región de la Araucanía, zona donde se encuentran las cuencas seleccionadas. En la Figura 4.5 es posible apreciar la fórmula obtenida, además de la nube de puntos con la cual se trazó la regresión. En esta fórmula, la precipitación corresponde a la precipitación promedio anual de la cuenca.



**Figura 4.5: Factor R Chile Central.** (Fuente: Bonilla y Vidal, 2011).

Para obtener la precipitación media anual de las cuencas, se utilizan los datos de las estaciones meteorológicas presentes tanto dentro como alrededor de la cuenca, donde la precipitación media anual se obtiene desde la página web del CR2<sup>2</sup>. Luego, se interpola con el programa QGIS la precipitación en el área de interés, para después aplicar la fórmula de Bonilla y Vidal (2011), obteniendo de esta manera la capa Raster para el factor R.

#### 4.4.2.- Erodabilidad del Suelo (Factor K).

La erodabilidad de un suelo es un factor determinado experimentalmente (Wischmeier y Smith, 1978), el cual depende de diversas características propias del suelo, tales como el contenido de materia orgánica, el tamaño de la partícula, la estructura del suelo y su permeabilidad.

En su trabajo, Wischmeier y Smith en el año 1978 proponen una expresión para realizar el cálculo de este factor, el cual tiene la siguiente ecuación:

$$K = \frac{[2.1 \cdot 10^{-4} \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (s - 2) + 2.5 \cdot (p - 3)]}{759} \quad (4.6)$$

donde OM corresponde al porcentaje que tiene el suelo de materia orgánica, M es un parámetro dado por el tamaño de partícula, el cual es estimado dado el porcentaje de limo y arcilla. Además, s es un parámetro dada la estructura del suelo y p es la permeabilidad de éste (Bonilla et al, 2010).

Otra fórmula para estimar el valor de K corresponde a la fórmula de Williams (1995), la cual consta de lo siguiente:

<sup>2</sup> <https://explorador.cr2.cl>

$$K = 0.1317 \cdot f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgC} \cdot f_{hisand} \quad (4.7)$$

$$f_{csand} = 0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[ -0.255 \cdot m_s \cdot \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \quad (4.8)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (4.9)$$

$$f_{orgC} = \left( 1 - \frac{0.25 \cdot orgC}{orgC + \exp [3.72 - 2.95 \cdot orgC]} \right) \quad (4.10)$$

$$f_{hisand} = \left( 1 - \frac{0.7 \cdot \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp [-5.51 + 22.9 \cdot \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right) \quad (4.11)$$

donde  $m_s$  corresponde al porcentaje de arena,  $m_{silt}$  es el porcentaje de limo,  $m_c$  el porcentaje de arcilla y  $orgC$  el porcentaje de contenido de carbón orgánico.

En el estudio se utiliza la ecuación 4.7, dado que los valores necesarios para obtener el factor K son proporcionados por un archivo vectorial de la FAO, donde se presentan los suelos para todo el planeta, además de diversas características de estos, tales como el porcentaje de arena, de limo, arcilla y del carbón orgánico, entre otras.

#### 4.4.3.- Factor debido a la Topografía (Factor LS).

El factor L, al igual que el factor S, corresponden a parámetros dada la topografía de la cuenca, por lo que la multiplicación de ambos representa el efecto que tiene la topografía en la erosión.

Respecto al factor L, Wischmeier y Smith (1978) definen este como la longitud que recorre una gota de escorrentía desde que se forma hasta que encuentra un cauce o una zona de sedimentación. Estos lo estiman según la expresión:

$$L = \left( \frac{l}{22.1} \right)^m \quad (4.12)$$

Siendo  $l$  la longitud de la ladera en metros y  $m$  un exponente que depende de la pendiente que se tenga. Este último es estimado por la siguiente ecuación (Neitsch et al, 2005):

$$m = 0.6 \cdot (1 - \exp [-35.835 \cdot \theta]) \quad (4.13)$$

con  $\theta$  el ángulo de la pendiente.

En cuanto al factor S, al estar asociado directamente con la pendiente de la cuenca. La influencia que tiene es notable, dado que esta es la que proporciona diferentes

características del flujo que escurre, donde un ejemplo de esto corresponde a la velocidad y arrastre que tiene el agua en las laderas (ICONA, 1991).

Para la obtención del factor S, Wischmeier y Smith (1978) proponen la siguiente expresión:

$$S = 65.41 \cdot \sin^2 \theta + 4.56 \cdot \sin \theta + 0.065 \quad (4.14)$$

siendo  $\theta$  el ángulo de la pendiente, al igual que en la ecuación 4.13.

Para este trabajo, el factor LS se obtiene a través de la fórmula de Moore y Nieber (1989), la cual determina el factor LS en un archivo de capa Raster para cada píxel que lo constituye. La fórmula corresponde a:

$$LS = \left( \frac{A_s}{22.13} \right)^n \cdot \left( \frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^m \quad (4.15)$$

donde  $A_s$  corresponde al área que tiene cada píxel y  $\beta$  es el ángulo de la pendiente en grados. En cuanto a los parámetros  $n$  y  $m$ , Moore y Nieber (1989) indican valores de 0.4 y 1.3 respectivamente.

La obtención de la capa se da al utilizar un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) y el software SAGA GIS en su versión 2.3.2, donde este tiene ya implementado un módulo donde utiliza la ecuación de Moore y Nieber. No obstante, antes de ingresar el DEM al programa SAGA GIS, se debe realizar un arreglo de este, el cual consta en corregir las depresiones que se tiene en el DEM.

#### 4.4.4.- Cubierta del Suelo (Factor C).

La cubierta vegetal es un elemento natural que protege al suelo de la erosión, dado que al llegar a impactar con la cobertura, se evita que toda la energía que tiene la precipitación llegue de lleno al suelo. Esto implica que mientras mayor sea la cobertura vegetal, menor será la erosión. Respecto a los valores que se tienen, mientras menor sea la cobertura vegetal, más cercano a 1 será el valor, mientras que valores con mayor vegetación o que presenten agua o nieve presentarán valores de cero o cercanos a este.

Para el cálculo de este, Wischmeier y Smith (1978) hablan acerca del uso de suelo que se tiene, en donde se tiene un valor de C para cada especie de la cubierta vegetal. Dado que el proceso para obtener estos valores es complicado (en especial para cuencas de una gran extensión), es que existen relaciones para obtener el factor C con ayuda del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), el cual se obtiene a través de imágenes satelitales con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \left( \frac{IR_{cercano} - Rojo_{visible}}{IR_{cercano} + Rojo_{visible}} \right) \quad (4.16)$$

donde  $IR_{cercano}$  corresponde a la banda infrarroja cercana (que refleja la vegetación) y  $Rojo_{visible}$  es la luz roja visible (que absorbe la vegetación), los cuales corresponden a productos satelitales.

Para llevar el NDVI al factor C, se utiliza la fórmula propuesta por Van der Knijff et al. (1999), la cual corresponde a:

$$C = e^{-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}} \quad (4.17)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  corresponde a 2 y 1 respectivamente.

En este caso se hará uso de la relación obtenida por Van der Knijff (Ecuación 4.17), donde las imágenes satelitales se obtendrán del satélite Landsat 8, el cual dentro de sus productos presenta las bandas necesarias para obtener el NDVI. En específico, se utilizan los datos desde el año 2013 hasta el 2019, que corresponde a periodos donde se puede obtener un promedio anual del NDVI.

#### **4.4.5.- Prácticas de Conservación del Suelo (Factor P).**

El factor P asociado al tipo de práctica de conservación del suelo, corresponde a una relación entre la erosión que sufre el suelo realizando la práctica de conservación con respecto a la erosión que habría según la máxima pendiente que se tenga en el terreno.

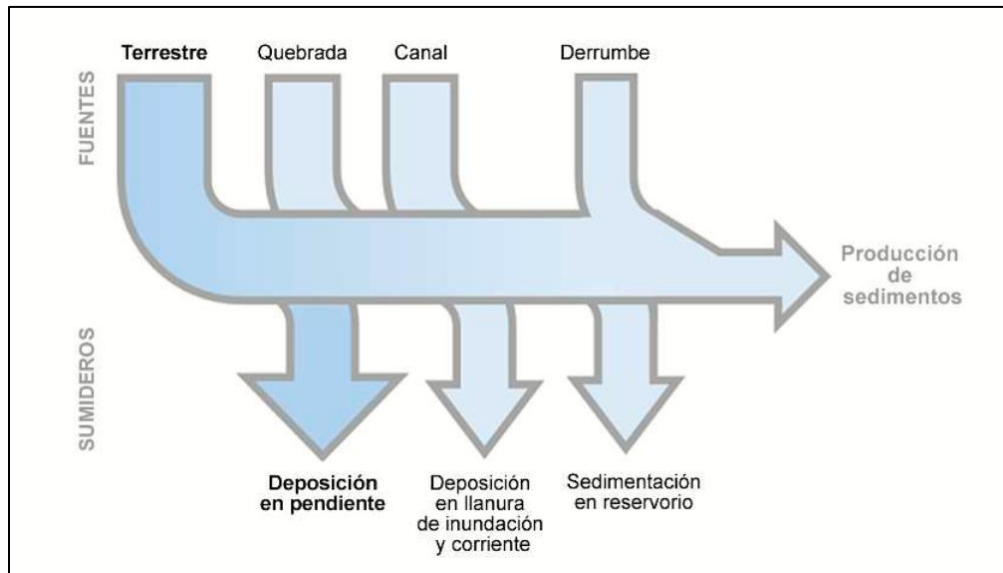
Los valores para este factor fluctúan entre 0 y 1, siendo 0 el caso en que el suelo tiene una muy buena resistencia a la erosión y 1 corresponde al hecho de que no existe una práctica de conservación. Wischmeier y Smith (1978) en su trabajo indican diversos valores de P según la práctica de conservación.

Dado que en este trabajo no se tienen datos referentes a prácticas de conservación del suelo, se toma el valor de  $P = 1$  para todas las cuencas, ya que con esta se maximiza la erosión potencial siendo que se tengan o no técnicas de conservación del suelo.

#### **4.4.6.- Índice SDR.**

El índice SDR corresponde, tal como se ha dicho anteriormente, a una relación entre la erosión potencial y la erosión neta, donde este tiene en cuenta diversos mecanismos de deposición de los sedimentos. Dados estos últimos es que se hace necesario un arreglo de los valores obtenidos por el método RUSLE, puesto que este último solo considera un potencial bruto. En la Figura 4.6 se aprecian procesos que se toman en cuenta con el índice SDR.





**Figura 4.6: Eventos que considera el índice SDR** (Fuente: Sharp et. al., 2018).

Como es apreciable en la Figura 4.6, para una correcta determinación de la producción de sedimentos se hace necesario considerar los sumideros que se tienen, dado que estos últimos hacen que el valor calculado por métodos como RUSLE se reduzcan en una gran proporción.

Respecto al cálculo de éste, existen variadas metodologías para su cálculo, las cuales pueden ser un valor que pondera el resultado total de RUSLE o que pondera el valor de cada píxel para luego obtener un valor final. Este último caso corresponde al índice SDR que se obtiene a través de *InVEST*, modelo desarrollado en la Universidad de Standford.

En este trabajo se obtendrá el valor del índice SDR por la fórmula que propuso la USDA en 2002, que solo relaciona el área total de la cuenca a través de la siguiente ecuación:

$$SDR = 0.51 \cdot A^{-0.11} \quad (4.18)$$

donde A corresponde al área de la cuenca en km<sup>2</sup>.

#### **4.5.- Gasto Sólido de Fondo.**

Como se sabe, el Gasto Sólido Suspendido es medido directamente desde las estaciones sedimentométricas, pero aún falta hablar de otra componente importante, la cual corresponde al Gasto Sólido de Fondo (GSF), que dada la dificultad que se tiene para su medición, no es posible realizarlo a través de las estaciones.

Para obtener el GSF, diversos autores proponen diferentes metodologías, tal como se apreció en la sección de Revisión Bibliográfica, pero un objeto en común corresponde a las variables utilizadas para obtener el GSF, puesto que utilizan la pendiente del cauce, la distribución granulométrica, el esfuerzo de corte del río, entre otras.

#### **4.5.1.- Curvas Granulométricas.**

El Gasto Sólido de Fondo se calcula para las arenas, gravas y bolones, por lo que una parte importante para obtener este corresponde al tamaño de los sedimentos y la distribución que se tiene. Esta razón hace que, para el cálculo de estos, sea necesaria la curva granulométrica del lecho del río, ya que con esta se puede observar en detalle la distribución de los sedimentos y que tanto de estos corresponden a limos, arcillas, arenas y gravas.

En este trabajo, tanto para el río Tinguiririca como para el río Itata, para la obtención de las curvas granulométricas se acude a trabajos disponibles en la web. En cambio, para el río Loncomilla, se realiza un viaje a una parte cercana a la estación con el objetivo de tomar fotografías de las riberas y poder estimar la curva granulométrica en base a estas, para la cual se utiliza el software *Digital Gravelometer* en su versión de prueba, el cual fue desarrollado por la Universidad de Loughborough de Reino Unido.

Para obtener la curva del río Loncomilla se toman diferentes fotografías, donde luego se seleccionan las mejores y se obtiene la curva granulométrica en base al promedio de las fotografías seleccionadas. Es importante decir que, al utilizar este método para obtener la curva granulométrica, no se puede obtener la cantidad de arena que se transporta, además de que no necesariamente con las fotos se pueda obtener una representación exacta de cómo es el lecho, dado que las fotografías son tomadas en la ribera del río y no directamente en el lecho. Cabe destacar que al obtener la curva granulométrica de esta manera se está subestimando los valores del gasto sólido de fondo para esta cuenca, dado que se trabaja con un material más grueso.

#### **4.5.2.- Altura de Escurrimiento y Pendiente.**

Una parte importante para determinar el Gasto Sólido de Fondo corresponde tanto a la altura de escurrimiento que se tiene, además de la pendiente del río en el sector.

Dentro de las estadísticas obtenidas para el Gasto Sólido Suspendido (Archivos de la DGA), se tienen mediciones de la altura de escurrimiento según el caudal, por lo que la obtención de las alturas para cada río según el caudal que tengan se realiza directamente desde las relaciones obtenidas de los datos.

Por parte de la pendiente, a través del programa *Google Earth* se trazan trayectorias en distintas partes de la caja del río donde se encuentran las estaciones sedimentométricas, siendo la pendiente promedio entre las diferentes trayectorias la utilizada para los cálculos.

#### **4.5.3.- Cálculo Gasto Sólido de Fondo.**

Para estimar el GSF, se tienen diferentes relaciones, las cuales en su mayoría son obtenidas en laboratorios, tales como las ecuaciones planteadas por Meyer-Peter y Müller, Ashida y Michiue, Fernández-Luque y van Beek y Engelund y Fredsøe. Las particularidades

que comparten estas ecuaciones es que se basan en un esfuerzo de corte crítico y en un diámetro característico de la curva granulométrica, el cual generalmente corresponde al  $d_{50}$ .

Un problema de estos métodos corresponde a que, en caso de que el esfuerzo de corte crítico sea mayor al esfuerzo de corte que genera el cauce para el diámetro característico, se aproxima todo el GSF como cero, lo cual es incorrecto dado que, si bien no es capaz de transportar sedimentos del tamaño característico, si tiene la capacidad de mover sedimento asociados a tamaños más pequeños. Por lo anterior es que, para obtener el GSF, se utiliza el método propuesto por Wilcock & Crowe en el año 2003, en donde estos consideran la curva granulométrica completa, por lo que se considera el efecto de sobreexposición y escondimiento que se genera dada la heterogeneidad del lecho.

Para obtener el GSF por el método de Wilcock & Crowe se hace necesario conocer varios diámetros característicos de la curva granulométrica, donde en este trabajo se utilizarán diámetros cada un 10 [%], obteniendo diez diámetros con los cuales trabajar. Respecto a las ecuaciones a utilizar, se debe partir con la fórmula que considera el efecto de la sobreexposición y escondimiento, la cual tiene la siguiente forma:

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rm}} = \left( \frac{d_{si}}{d_{sm}} \right)^b \quad (4.19)$$

donde:

$\tau_{ri}$  [N/m<sup>2</sup>]: Esfuerzo de corte referencial para el diámetro  $i$  ( $d_{si}$ ).

$\tau_{rm}$  [N/m<sup>2</sup>]: Esfuerzo de corte del diámetro medio de la muestra ( $d_{sm}$ ).

En cuanto al exponente  $b$ , este se obtiene de la siguiente manera:

$$b = \frac{0.67}{1 + \exp \left[ 1.5 - \frac{d_{si}}{d_{sm}} \right]} \quad (4.20)$$

Para obtener el valor de  $\tau_{rm}$  es necesario recurrir a la relación con el parámetro adimensional de este, que se tiene por la siguiente ecuación:

$$\tau_{rm}^* = \frac{\tau_{rm}}{R \cdot \rho \cdot g \cdot d_{sm}} \quad (4.21)$$

$$\tau_{rm}^* = 0.021 + 0.015 \cdot \exp(-20 \cdot F_s) \quad (4.22)$$

donde:

$\tau_{rm}^*$  [-]: Esfuerzo de corte del diámetro medio adimensional.

$F_s$  [%]: Porcentaje de arena que transporta el río. (Valores entre 0.05 [mm] y 2 [mm] de la curva granulométrica, dado que estos son los usados por Wilcock & Crowe).

La función de transporte (o ley de gasto) que se propone corresponde a una función por partes, la cual corresponde a:

$$W_i^* = \begin{cases} 0.002 \cdot \phi^{7.5} & \phi < 1.35 \\ 14 \cdot \left(1 - \frac{0.894}{\phi^{0.5}}\right)^{4.5} & \phi \geq 1.35 \end{cases} \quad (4.23)$$

$$\phi = \frac{\tau}{\tau_{ri}} \quad (4.24)$$

donde:

$\tau$  [N/m<sup>2</sup>]: Esfuerzo de corte producido por el flujo.

$\phi$  [-]: Relación entre el esfuerzo de corte del flujo y el esfuerzo de corte de referencia para el diámetro  $d_{si}$ .

Luego, para obtener el gasto sólido por unidad de ancho se necesita la siguiente ecuación:

$$q_{si} = \left( \frac{W_i^* \cdot F_i \cdot u_*^3}{R \cdot g} \right) \quad (4.25)$$

donde:

$F_i$  [-]: Proporción  $d_{si}$  en la curva granulométrica. Para este caso se está haciendo cada un 10 [%], por lo que el valor de  $F_i$  corresponde a 0.1.

$u_*$  [m/s]: Velocidad de corte del flujo.

Finalmente, para obtener el valor final del GSF se suma para diámetro con el que se trabaja, por lo que se tiene:

$$q_s = \sum q_{si} \quad (4.26)$$

## Capítulo 5 : Resultados Obtenidos.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al utilizar la metodología presente en el capítulo anterior.

### 5.1.- Relaciones Gasto Sólido Suspendido.

En las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se aprecian las relaciones obtenidas entre el GSS Rutinario (GSSR desde ahora) y el caudal para cada una de las estaciones. En naranja se puede apreciar la regresión dada por el programa Excel, mientras que en negro se observa la regresión con la cual se trabaja, obtenida mediante la metodología dada, exceptuando por el Río Tinguiririca. El motivo por el cual realizar regresiones diferentes a las dadas por el programa corresponde a que las relaciones en naranja subestimaban los valores, ya que se ve que para el caso del Río Loncomilla y del Río Itata no se seguía la tendencia de los datos.

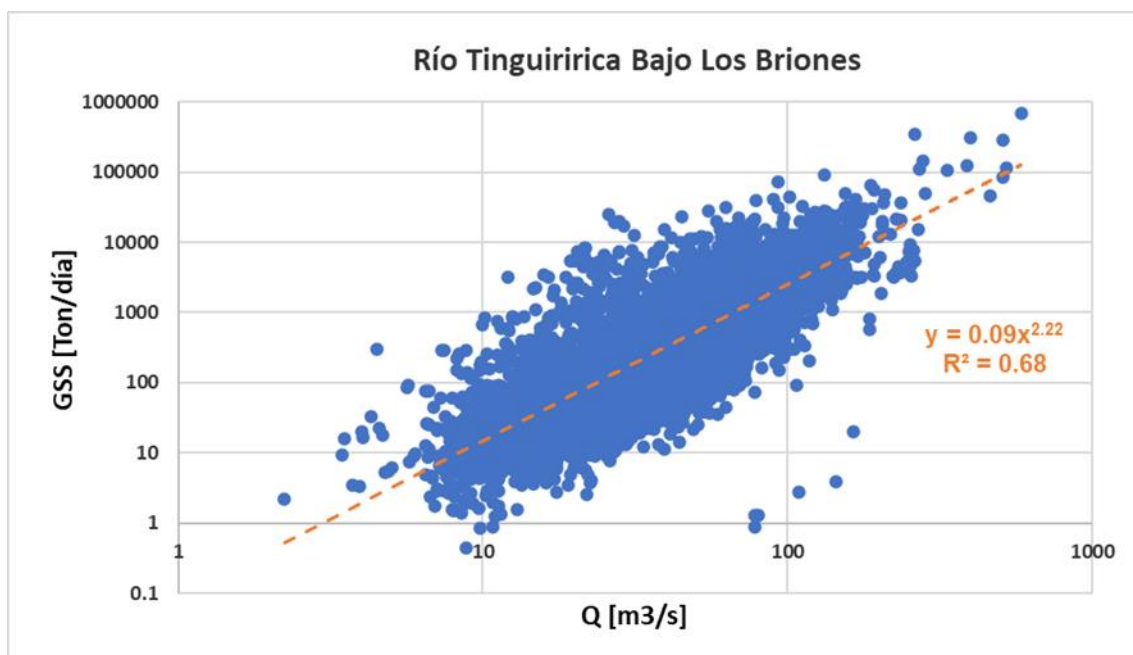


Figura 5.1: Gráfica GSS v/s Caudal y su regresión asociada para Estación Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

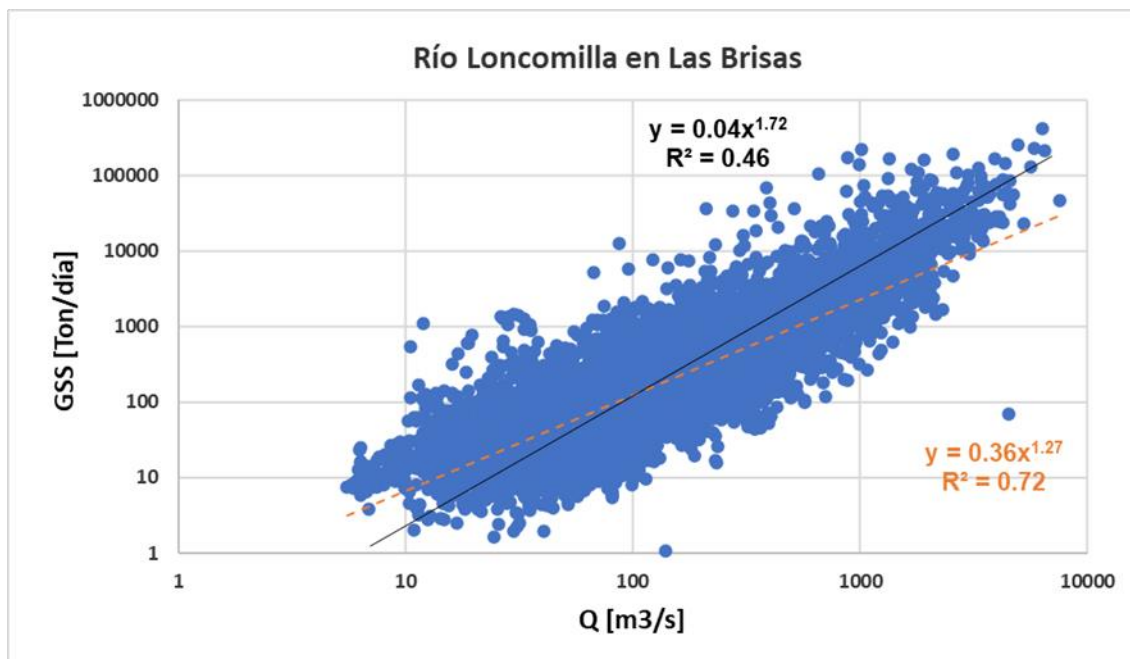


Figura 5.2: Gráfica GSS v/s Caudal y su regresión asociada para la estación Río Loncomilla en Las Brisas.

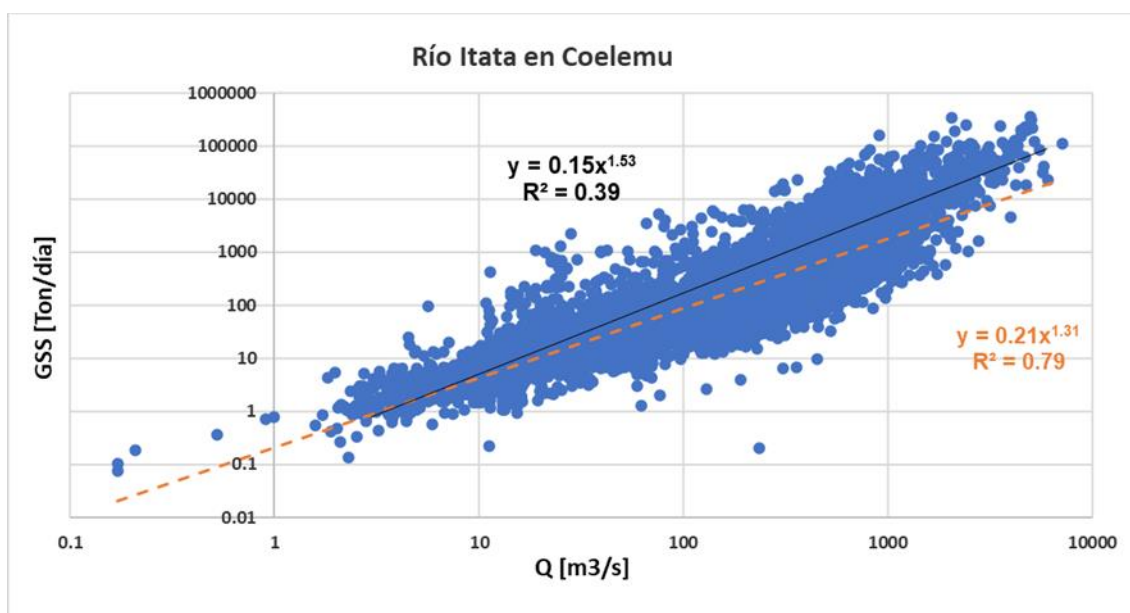


Figura 5.3: Gráfica GSS v/s Caudal y su regresión asociada para la estación Río Itata en Coelemu.

En cuanto a los datos obtenidos, se puede apreciar en las Figura 5.1, 5.2 y 5.3 que existe una gran dispersión de los puntos, los cuales no se encuentran sobre la regresión obtenida, ya que para mismos caudales se tienen valores diferentes de GSSR. Al analizar el 10 [%] de los valores máximos, se pudo ver que en su mayoría estos ocurrían durante los meses de invierno y comienzo de primavera. Esto indica que en su mayoría los valores que tienen asociados mayores valores del GSSR se encuentran involucrados con precipitaciones, dado que los valores más altos se tenían para años donde no hubo sequías. Además, al ver el

valor anual de GSSR, se vio que luego de años donde existieron incendios forestales severos, más alto era el GSSR que se reportaba en las estaciones.

Respecto a las relaciones entre el GSS Integrado (GSSI desde ahora) y GSSR, luego de obtener los datos para las mismas fechas se aplica un filtro, el cual corresponde a que si existen datos del GSSR mayores a los del GSSI, estos son excluidos. Teniendo en cuenta lo anterior, se obtienen las siguientes relaciones:

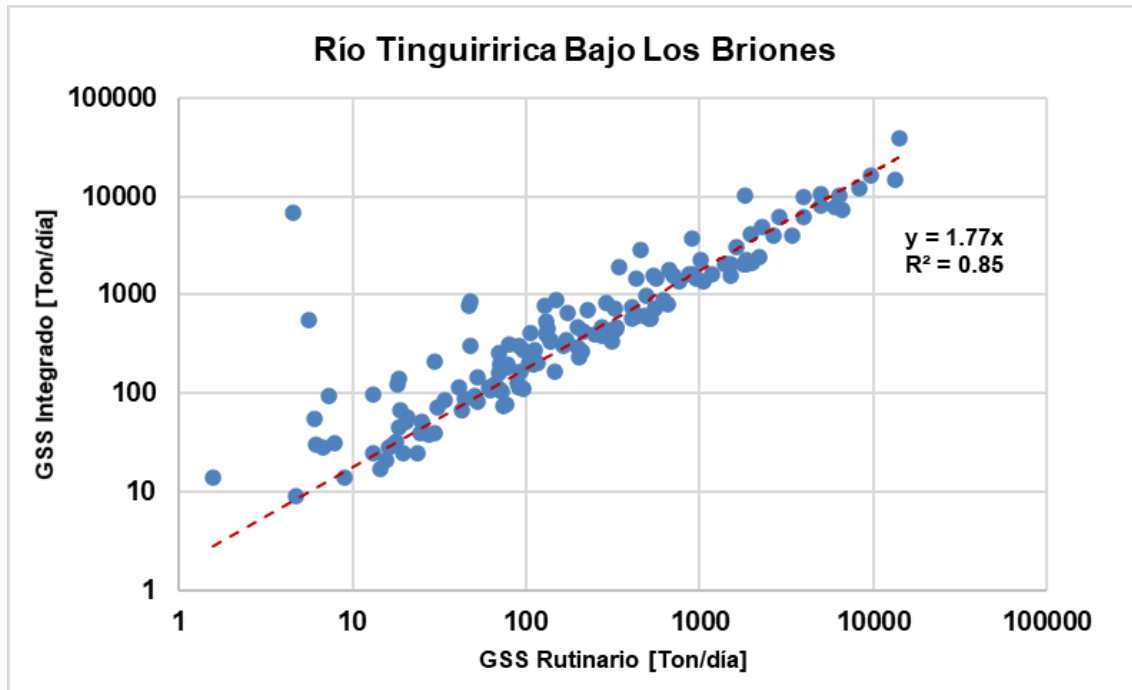


Figura 5.4: GSS Integrado v/s GSS Rutinario para la estación Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

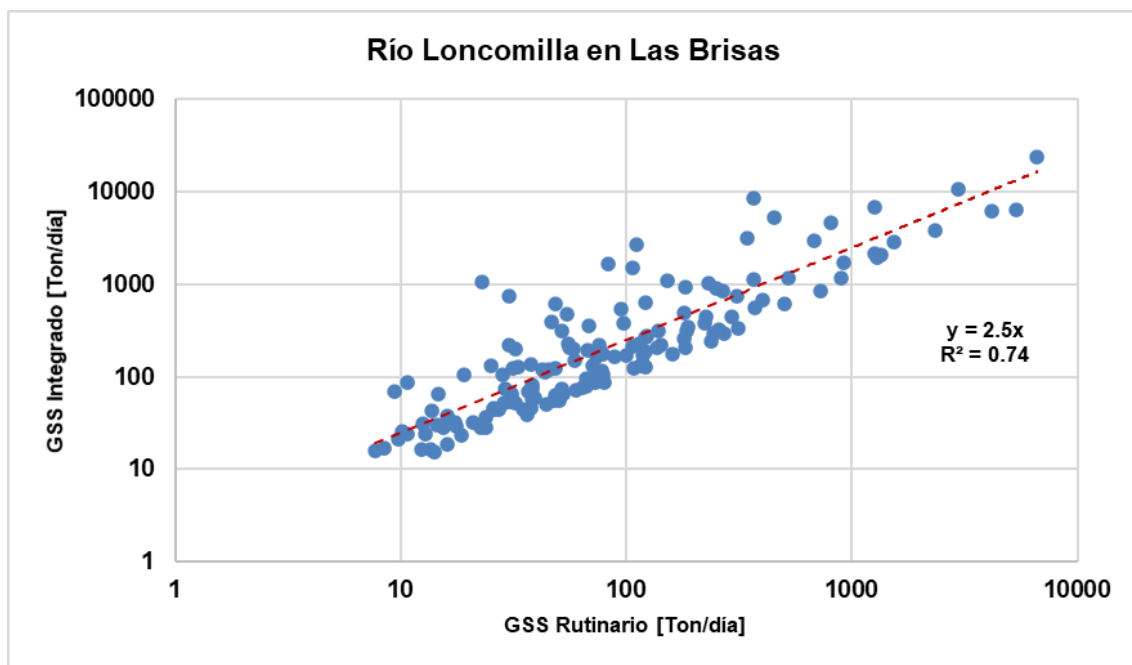
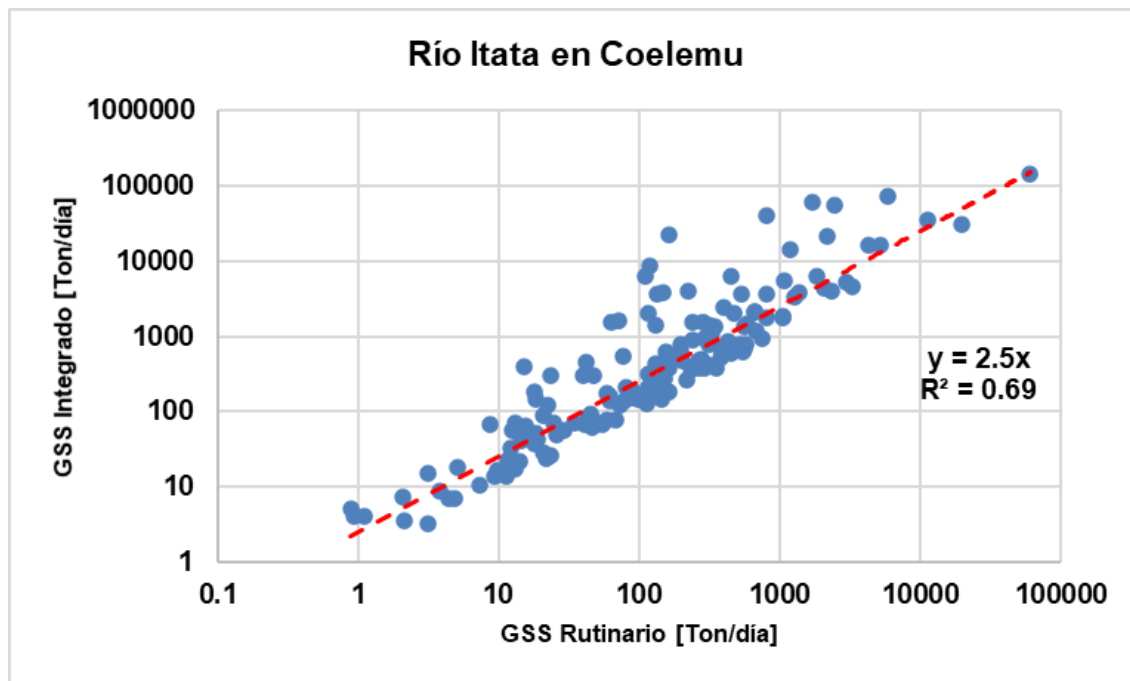


Figura 5.5: GSS Integrado v/s GSS Rutinario para la estación Río Loncomilla en Las Brisas.



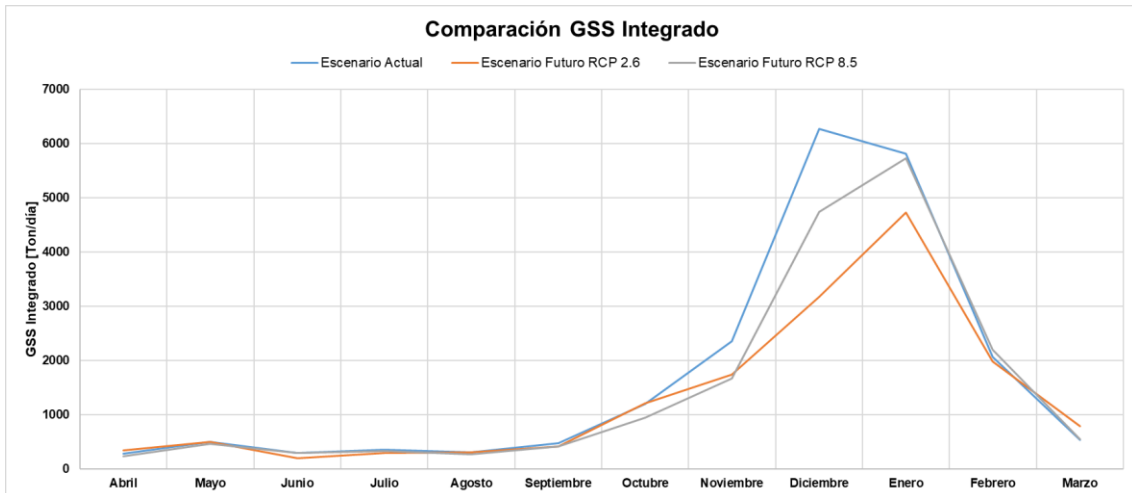
**Figura 5.6: GSS Integrado v/s GSS Rutinario para la estación Río Itata en Coelemu.**

Como se puede apreciar en las tres figuras anteriores, se tiene un claro comportamiento entre el GSSI y el GSSR, siendo estas rectas de la forma que lo propone la literatura. Como se aprecia, tanto la cuenca del Loncomilla con la del Itata presentan el mismo factor entre el GSSI y el GSSR.

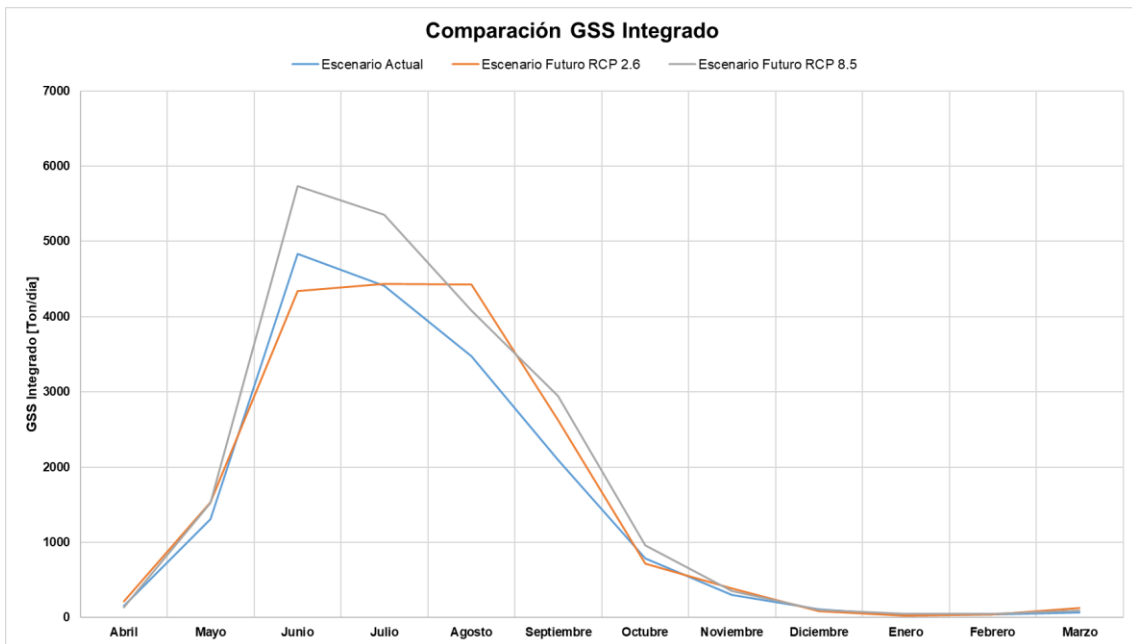
La importancia de las relaciones anteriores corresponde a que con estas se obtienen los valores del GSSI que transportan los ríos para la situación actual y futura.

Para obtener los valores del GSSI para ambos escenarios, se reemplaza los valores de caudales para la situación actual y futura, obteniendo lo que se muestra en las Figuras 5.7 a la 5.9 y en la Tabla 5.1:





**Figura 5.7: GSS Integrado promedio para los tres escenarios en la estación Río Tinguiririca Bajo Los Briones.**



**Figura 5.8: GSS Integrado promedio para los tres escenarios en la estación Río Loncomilla en Las Brisas.**

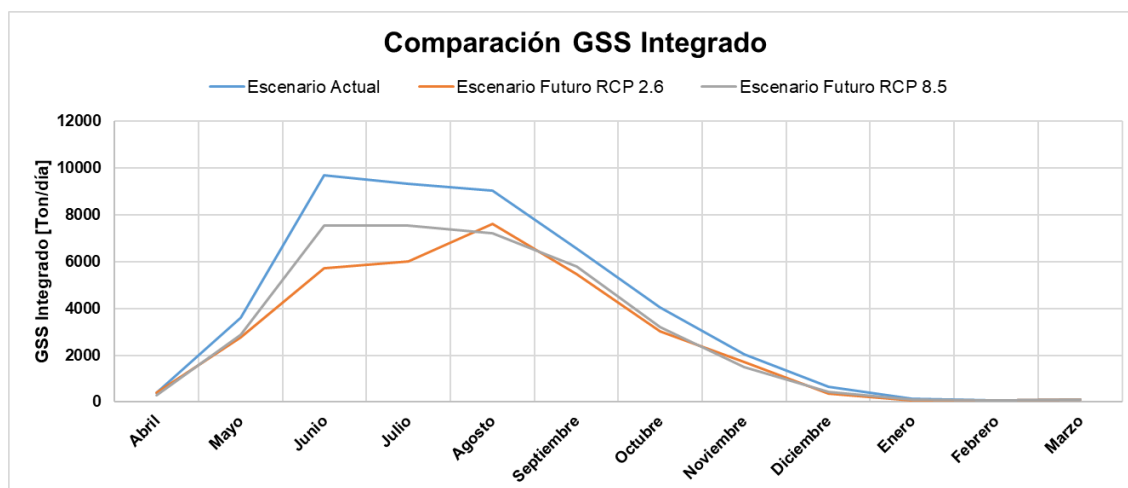


Figura 5.9: GSS Integrado promedio para los tres escenarios en la estación Río Itata en Coelemu.

Tabla 5.1: Producción anual promedio de sedimentos por cuenca para el escenario Actual y escenarios Futuros.

	Río Tinguiririca	Río Loncomilla	Río Itata
Producción Actual [Ton/año]	623,916.79	673,448.93	1,164,613.08
Producción a Futuro RCP 2.6 [Ton/año]	477,730.39	580,089.12	1,019,955.03
Producción a Futuro RCP 8.5 [Ton/año]	543,517.57	654,002.35	1,121,252.37
Diferencia Actual con RCP 2.6 [Ton/año]	-146,186.40	-93,359.81	-144,658.05
Diferencia Actual con RCP 2.6 [%]	-23.43	-13.86	-12.42
Diferencia Actual con RCP 8.5 [Ton/año]	-80,399.22	-19,446.58	-43,360.71
Diferencia Actual con RCP 8.5 [%]	-12.89	-2.89	-3.72

Si se realiza una comparación entre las Figura 5.7, 5.8 y 5.9 con las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente, se puede apreciar que la forma de estas es igual, donde solo varían los valores dado que existen factores por los cuales son multiplicados los valores del Caudal.

Por parte del escenario RCP 2.6, se puede apreciar que tiene las mayores pérdidas de GSS asociadas en cuanto a los dos escenarios futuros, puesto que es el escenario que presenta una mayor disminución del caudal, tal como se explicó anteriormente.

En cuanto a la cuenca con más pérdidas, esta corresponde a la cuenca del Río Tinguiririca, siendo la más afectada en los dos escenarios estudiados, con pérdidas de un 23.43 [%] y 12.89 [%] para el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5, respectivamente. Es importante destacar el nivel de producción de sedimentos de la cuenca del Tinguiririca, dado que a pesar de ser la más pequeña de las tres, su nivel de producción de sedimentos se encuentra al nivel de la cuenca del Loncomilla, la cual es alrededor de diez veces más grande.

Al comparar la pérdida de sedimentos con la de caudal en el escenario RCP 2.6, donde la última corresponde a un 7.59, 7.56 y 7.90 [%] a nivel anual para la cuenca del río Tinguiririca, Loncomilla e Itata, respectivamente, se tiene que dada la disminución de los

sedimentos transportados, la cuenca del río Tinguiririca es la que se verá más afectada en cuanto a la concentración de sedimentos que se transportan. En cuanto al escenario RCP 8.5, donde la reducción de caudal corresponde a 5.55, 1.93 y 2.72 [%] para las cuencas ordenadas de norte a sur, respectivamente, sigue siendo el río Tinguiririca el más afectado, mientras que en las otras cuencas no existe una reducción tan brusca

En cuanto a los valores mensuales extremos, se tiene que en el río Tinguiririca, para el escenario RCP 2.6, en los meses de junio, julio, septiembre, noviembre, diciembre, enero y febrero existe una reducción del GSS, donde la mayor reducción se tiene en el mes de diciembre, reduciéndose en un 49.37 [%], con una reducción de caudal correspondiente a un 26.36 [%]. Por parte del escenario RCP 8.5, las reducciones se tienen en casi todo el año, excepto por los meses de febrero y marzo, donde existe un leve aumento de un 6.35 y 1.99 [%], respectivamente. En este escenario, el mes donde existe una mayor reducción corresponde a noviembre, donde disminuye un 29.05 [%], con una pérdida de caudal del 14.30 [%].

En la cuenca del río Loncomilla, en el escenario RCP 2.6, la reducción se tiene en los meses de mayo, junio, julio, octubre, diciembre, enero y febrero, donde la mayor reducción se tiene para el mes de diciembre, siendo ésta de un 38.51 [%]. Además, se pronostica un aumento en la tasa de sedimentos para el mes de marzo, aumentando ésta en un 43.52 [%]. Por parte del escenario RCP 8.5, las reducciones se tienen en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre, donde la mayor reducción se tiene en el mes de abril, con un 26.07 [%]. En cuanto al mayor aumento para este escenario, corresponde al mes de enero, con un 16.25 [%].

Respecto al río Itata, considerando el escenario RCP 2.6, las reducciones se aprecian en los meses de mayo, junio, julio, octubre, diciembre, enero y febrero, donde la reducción en el mes de diciembre alcanza un máximo de 31.89 [%]. En cuanto al aumento para este escenario, el mayor se tiene en el mes de marzo, con un 31.60 [%]. Para el escenario RCP 8.5, las reducciones ocurren en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre, donde la mayor disminución corresponde a este último mes, con un valor de 19.13 [%]. Además, el mayor aumento se tiene es para el mes septiembre con un 6.09 [%].

Es importante destacar que los valores anteriores fueron determinados con las regresiones en negro de las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3, puesto que al existir una gran dispersión de los datos, es probable que a futuro se pueda desplazar la regresión hacia arriba o hacia abajo, obteniendo un mayor o menor valor a futuro, respectivamente.

Como se aprecia en la Tabla 5.1, la mayor reducción se tiene para el escenario RCP 2.6 en todas las cuencas, pero a su vez se tiene que para el escenario RCP 8.5 es donde existen mayores meses con reducción. Esto se explica puesto que para el RCP 2.6 las disminuciones son mayores, en todos los meses donde existe, en comparación con el RCP 8.5. (Ver anexo A)

## **5.2.- Método RUSLE/SDR.**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el método RUSLE/SDR para cada una de las cuencas, en donde se muestran resultados para cada capa que se ocupa y la erosión de los tres escenarios propuestos, es decir, el escenario actual, RCP 2.6 y RCP 8.5. Cabe destacar que más detalles respecto a las capas se aprecian en la sección de Anexos, específicamente el Anexo B.

Dado lo repetitivo del proceso de obtener los valores y capas del método RUSLE/SDR, se ocupará la cuenca de la estación Río Tinguiririca para explicar decisiones una vez tenidas las capas, además de indicar aspectos generales considerados, mientras que para las otras dos cuencas solo se presentarán los resultados. Es importante indicar que existe una consideración extra para la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas, la cual se explica en la sección dedicada a esta cuenca.

### 5.2.1.- Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

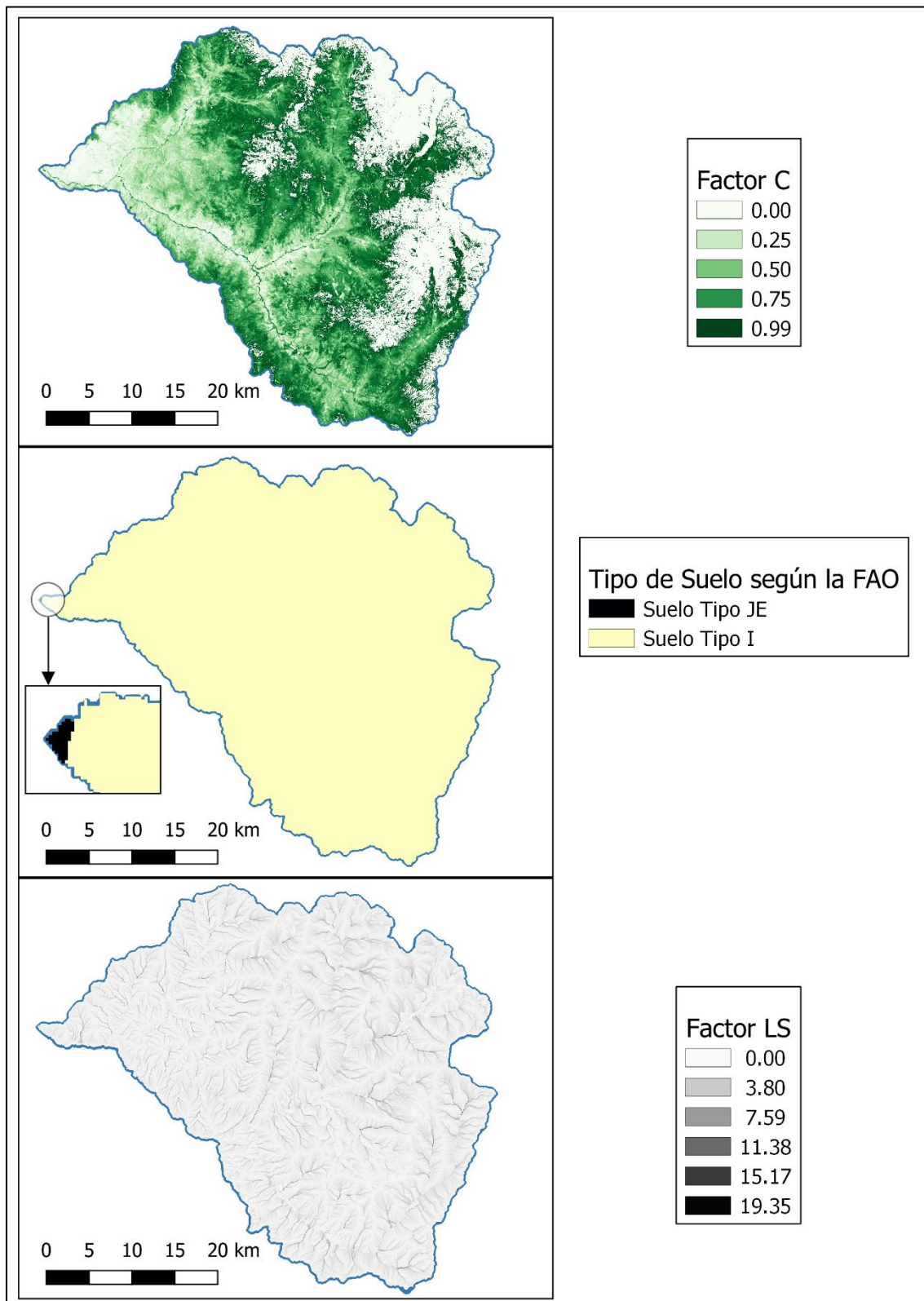


Figura 5.10: Resultados Capas C, K y LS para Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

De la Figura 5.10 es posible apreciar los resultados de las capas asociadas a la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la topografía del lugar. En cuanto a la primera, con el NDVI obtenido de las imágenes, se obtuvieron valores mayores a 1, lo cual corresponde a agua o nieve, razón por la que todos los valores mayores a 1 se obviaron, cambiando este valor por el de 0. Este paso fue realizado para todas las cuencas.

En cuanto al tipo de suelo que se presenta en la cuenca, se aprecia que existe en la mayoría de la cuenca solo 1 tipo de suelo, donde la FAO representa este como suelo I (Litosol), mientras que solo existe una pequeña porción del suelo JE (Fluvisol éutrico), ubicándose este solo al final de la cuenca. (Detalles respecto al tipo de suelo y el valor de K se encuentra en el Apéndice B)

Respecto a Capa R, asociada a la precipitación, se presenta la Figura 5.11.

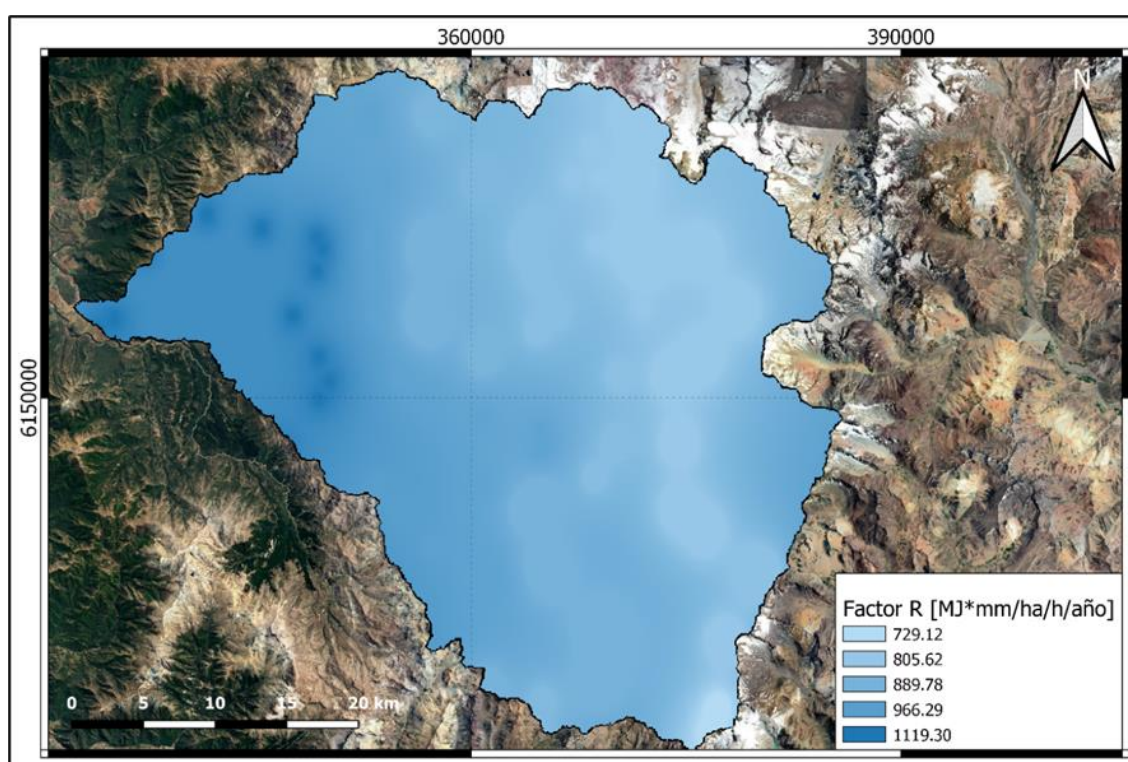
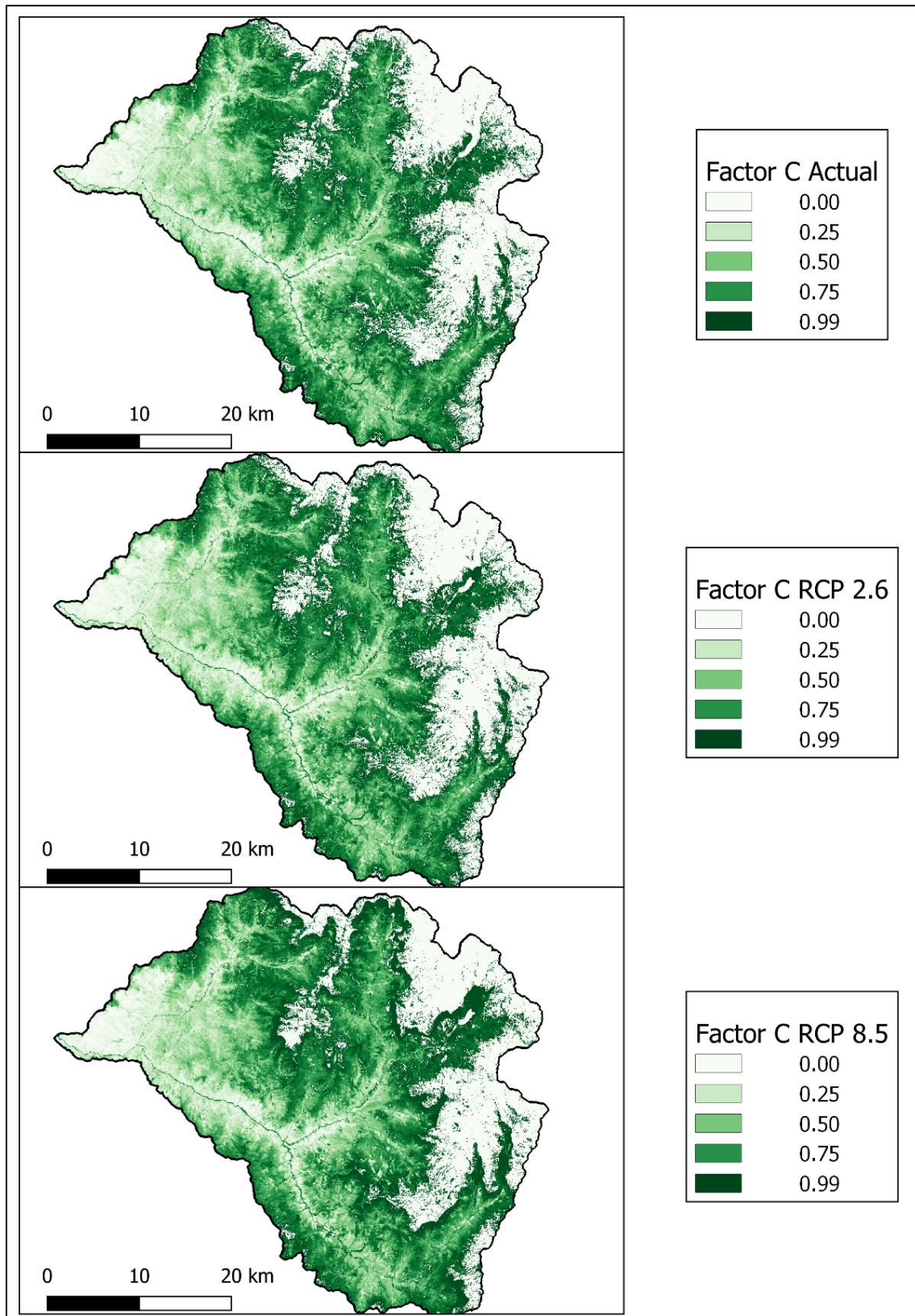


Figura 5.11: Resultados Capa R para el escenario Actual en Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

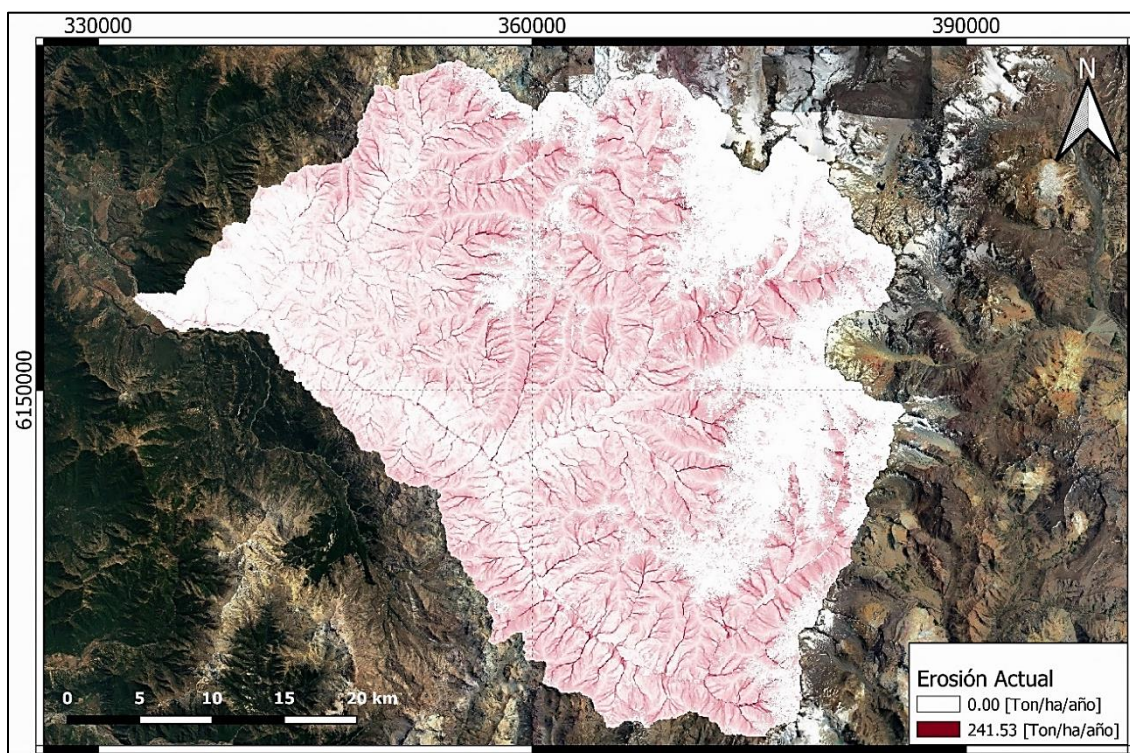
Como se aprecia en la Figura 5.11, se tiene que los valores para esta capa van desde 729.12 hasta los 1,119.30 [MJmm/ha/h/año]. La razón de no presentar las capas asociadas a los escenarios futuros se debe a que dada la mínima reducción de precipitaciones. En cuanto al escenario RCP 2.6 el valor mínimo corresponde a 731.02 [MJmm/ha/h/año] uno máximo de 1,122.22 [MJmm/ha/h/año]. Respecto al escenario RCP 8.5, el valor mínimo es de 728.00 [MJmm/ha/h/año], mientras que el máximo es de 1,117.58 [MJmm/ha/h/año].



**Figura 5.12: Resultados Capa C para el Escenario Actual, RCP 2.6 y RCP 8.5 en Río Tinguiririca Bajo Los Briones.**

En la Figura 5.12 se aprecian las capas utilizadas para el factor C tanto para el escenario actual, RCP 2.6 y RCP 8.5. Si bien no se pudo obtener un cambio en el uso de suelo por parte de la vegetación en el periodo 2030 – 2060, si se puede obtener un cambio por parte de la cobertura nival dado el aumento de temperaturas. Para lo anterior se obtuvo la línea de nieves promedio anual, y mediante la obtención del gradiente térmico por parte de las estaciones meteorológicas, se pudo ver el efecto que tiene el aumento de temperaturas.

Al realizar la multiplicación de las capas C, K, LS y R para el escenario actual y futuros, se obtienen las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15 respectivamente, las cuales se presentan a continuación.



**Figura 5.13: Mapa de Erosión para la Situación Actual Río Tinguiririca Bajo Los Briones.**



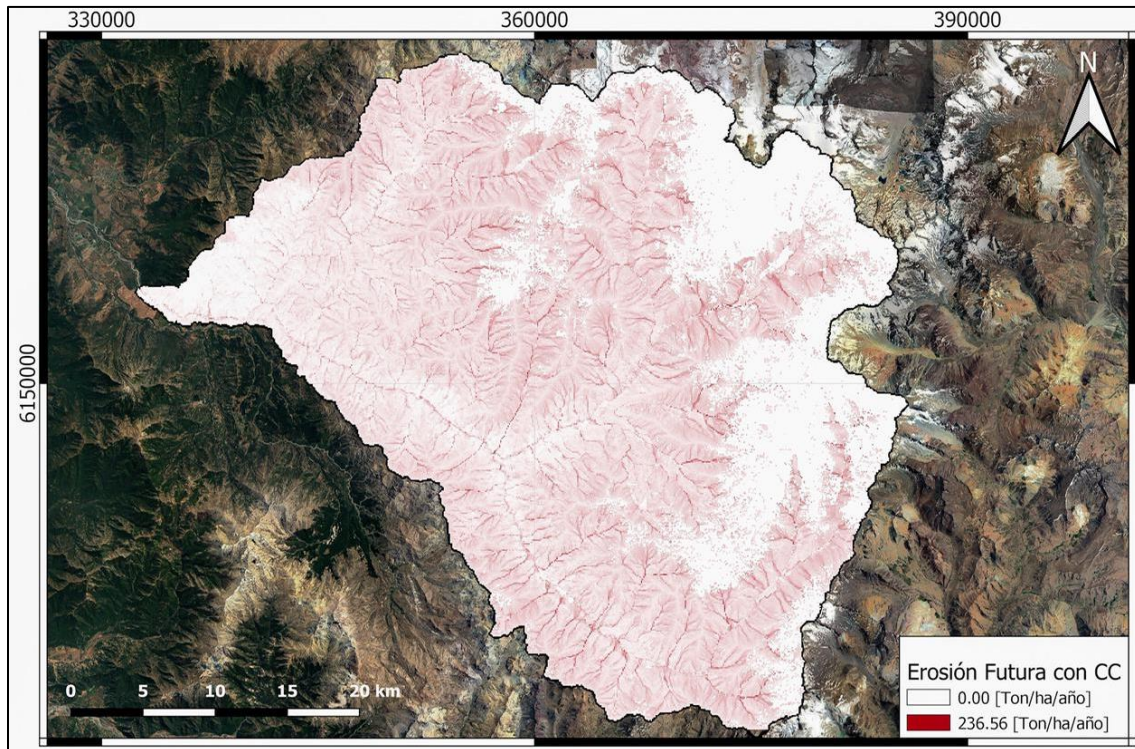


Figura 5.14: Mapa de Erosión para el escenario RCP 2.6 Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

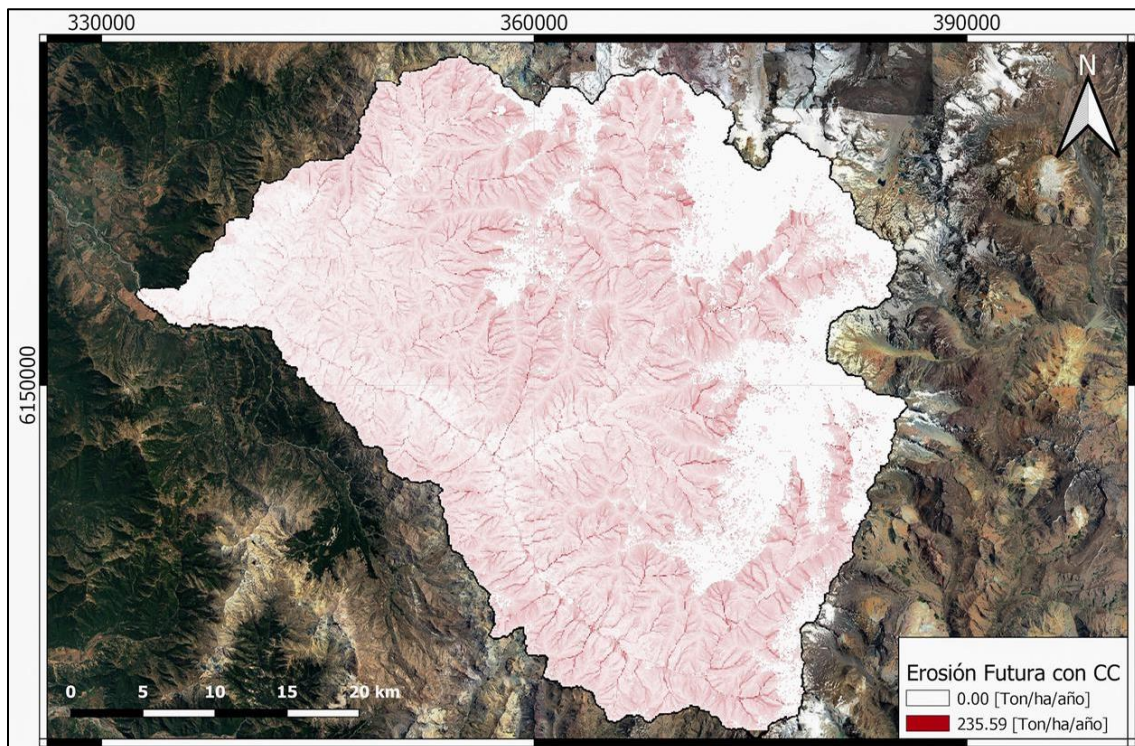


Figura 5.15: Mapa de Erosión para el escenario RCP 8.5 Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

Una vez obtenidos los valores del método RUSLE, se procede a calcular el total del sedimento que es erosionado por la precipitación, para lo cual se transforma el archivo ráster

en un archivo vectorial, luego se exporta en un archivo separado por comas (csv), con el cual se puede obtener la cantidad del material erosionado al realizar una transformación con el tamaño del píxel en metros cuadrados y el valor de una hectárea. Considerando esto, se llega a lo siguiente para ambos escenarios:

**Tabla 5.2: Resultados RUSLE en ambos Escenarios.**

	Escenario Actual	Escenario RCP 2.6	Escenario RCP 8.5
Resultados RUSLE [Ton/año]	2,397,171.77	2,512,978.59	2,781,556.28

Luego, utilizando la ecuación 4.18 se obtiene el valor del SDR, para utilizar a continuación la ecuación 4.5 y finalmente conseguir la erosión neta de la cuenca, donde los resultados al realizar esta acción se muestran a continuación.

**Tabla 5.3: Erosión Neta de la Cuenca para ambos Escenarios.**

Área Cuenca [km <sup>2</sup> ]	1,438.30
SDR USDA [-]	0.23
Erosión Neta Actual [Ton/año]	549,421.80
Erosión Neta RCP 2.6 [Ton/año]	575,964.24
Erosión Neta RCP 8.5 [Ton/año]	637,521.13
Variación RCP 2.6 [%]	4.83
Variación RCP 8.5 [%]	16.03

### 5.2.2.- Río Loncomilla en Las Brisas.

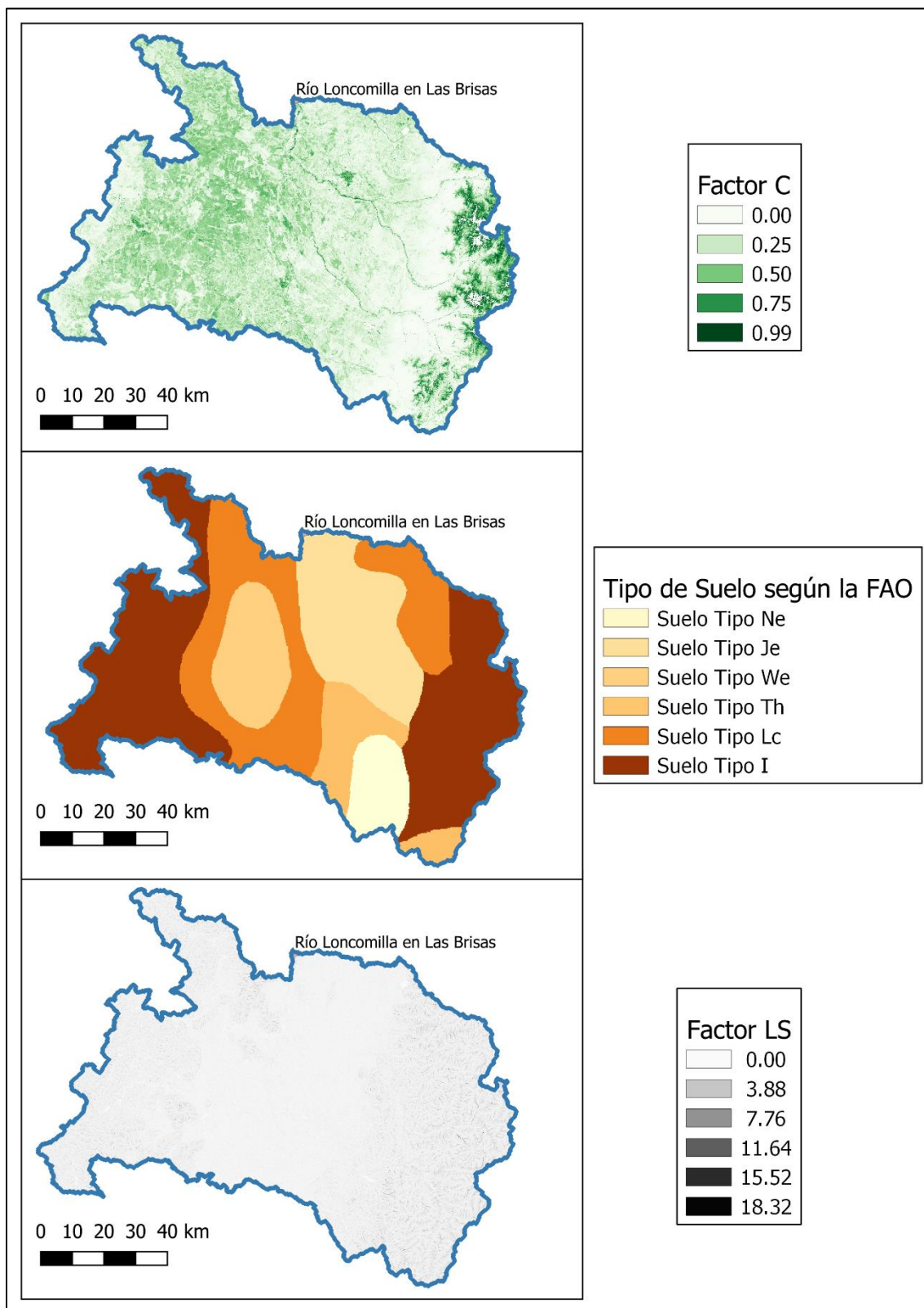


Figura 5.16: Resultados Capas C, K y LS para Río Loncomilla en Las Brisas.

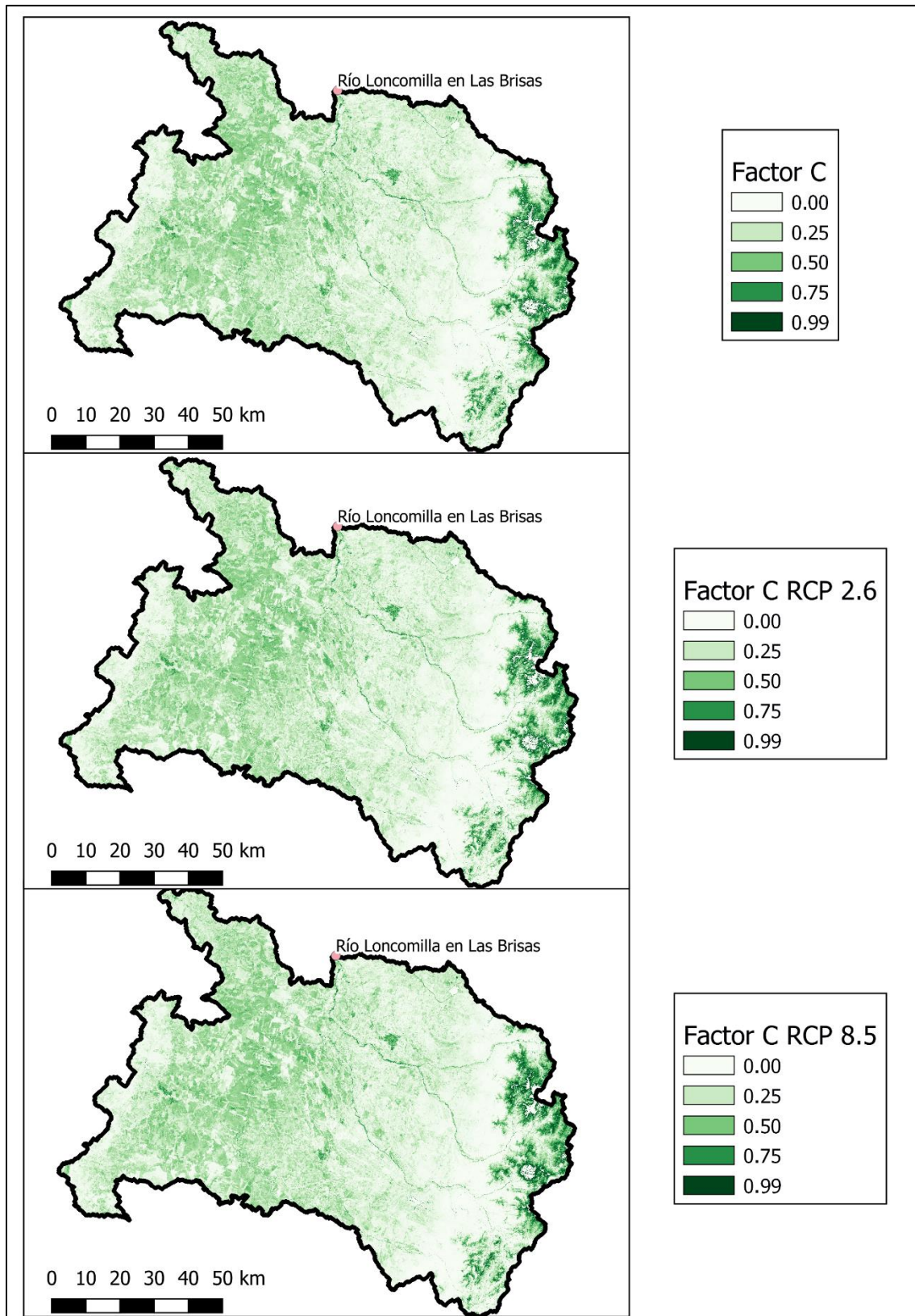
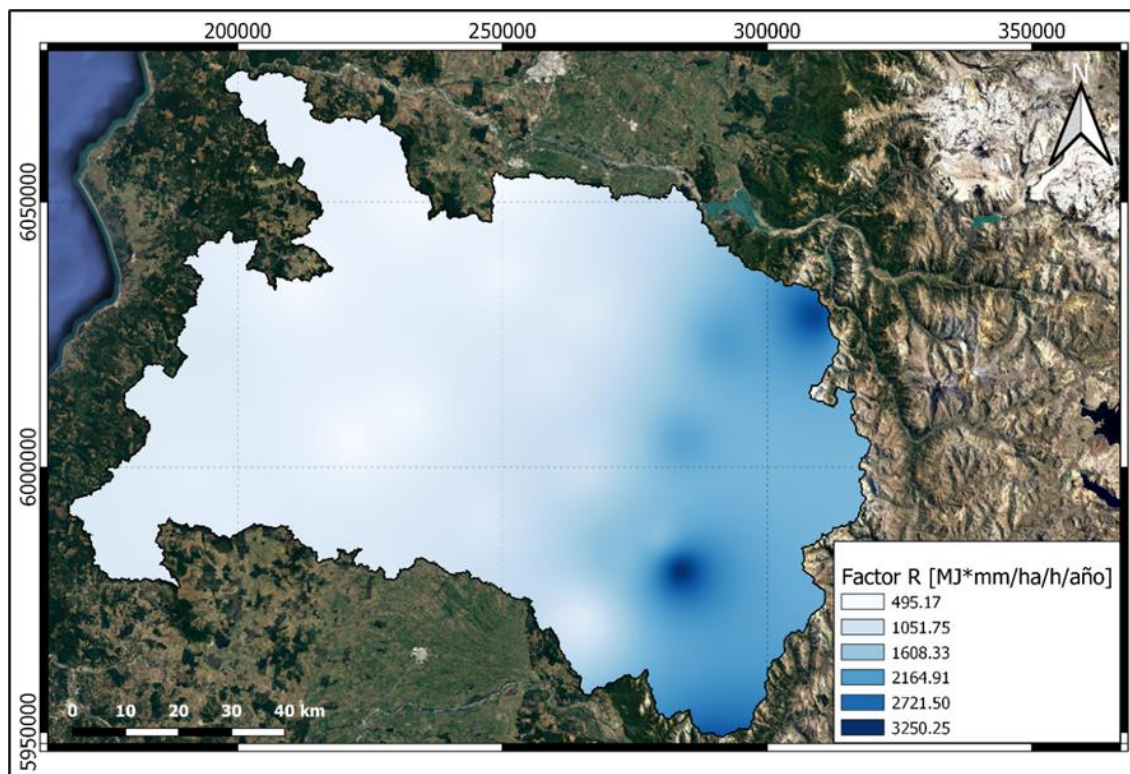


Figura 5.17: Resultados Capa C para el Escenario Actual, RCP 2.6 y RCP 8.5 para Río Loncomilla en Las Brisas.



**Figura 5.18: Resultados Capa R para el Escenario Actual para Río Loncomilla en Las Brisas.**

Para el escenario RCP 2.6, se tiene que el valor mínimo 494.41 [MJmm/ha/h/año] y el máximo 3,245.26 [MJmm/ha/h/año]. En cuanto al escenario RCP 8.5, el mínimo corresponde a 485.78 [MJmm/ha/h/año] y el máximo 3,188.63 [MJmm/ha/h/año].

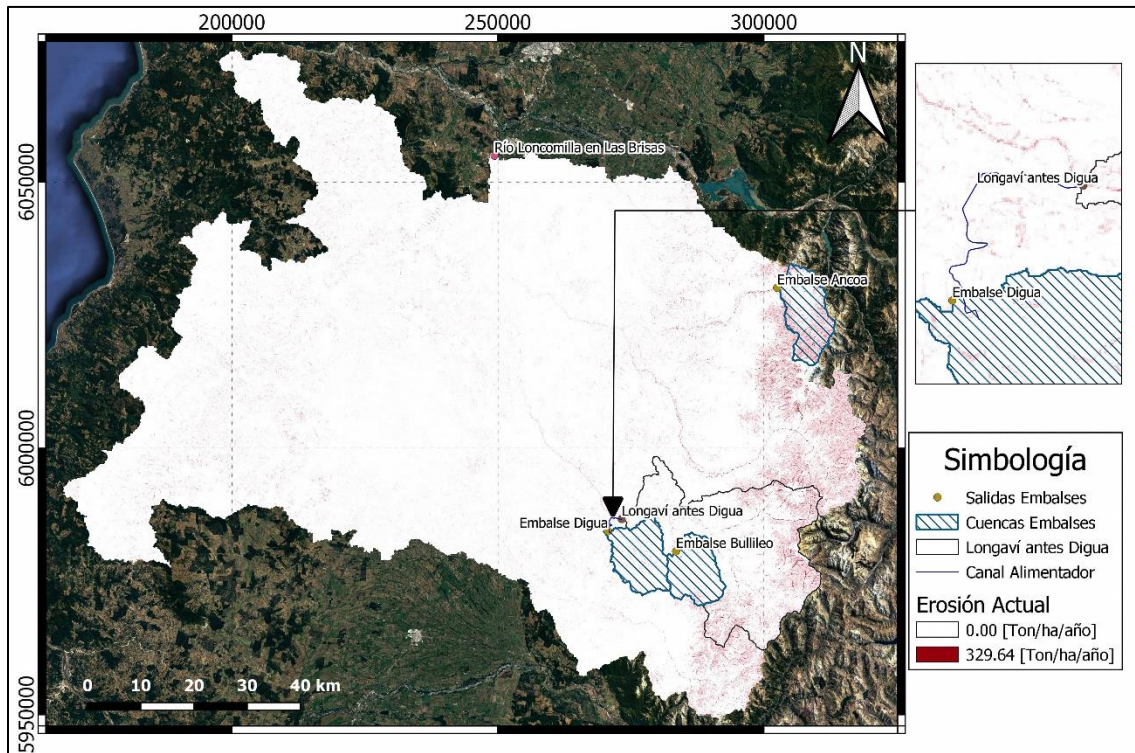


Figura 5.19: Mapa de Erosión para la Situación Actual para Río Loncomilla en Las Brisas.

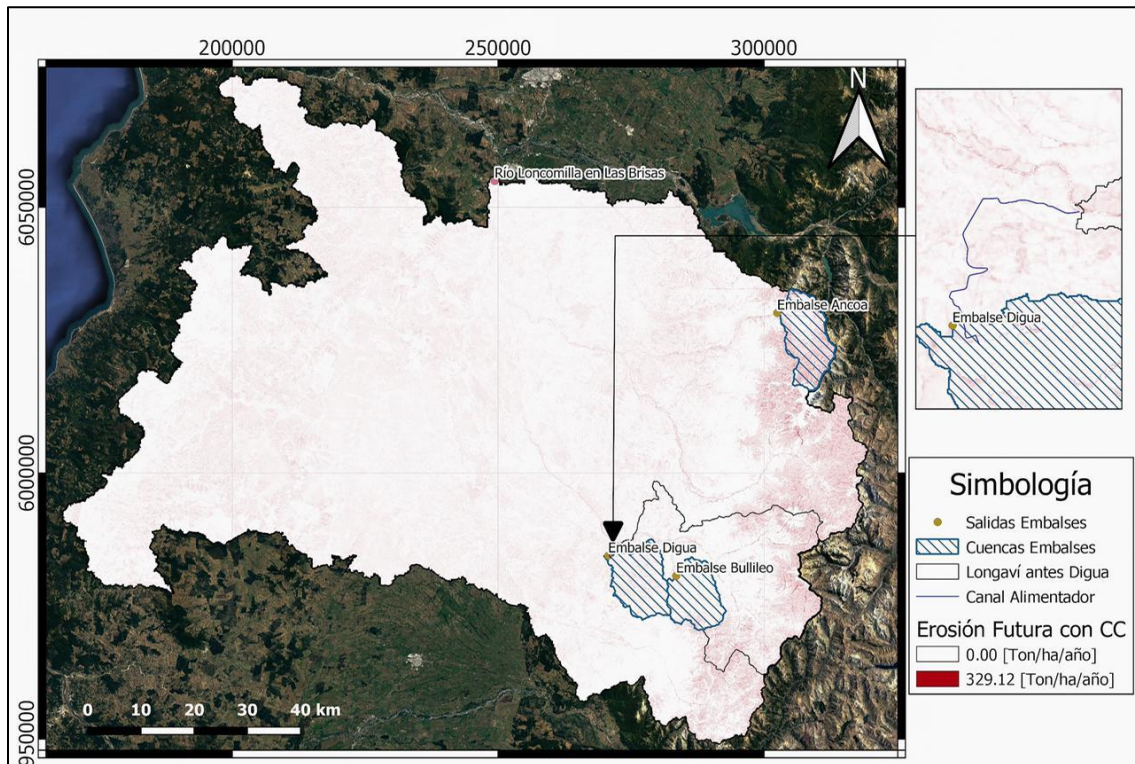
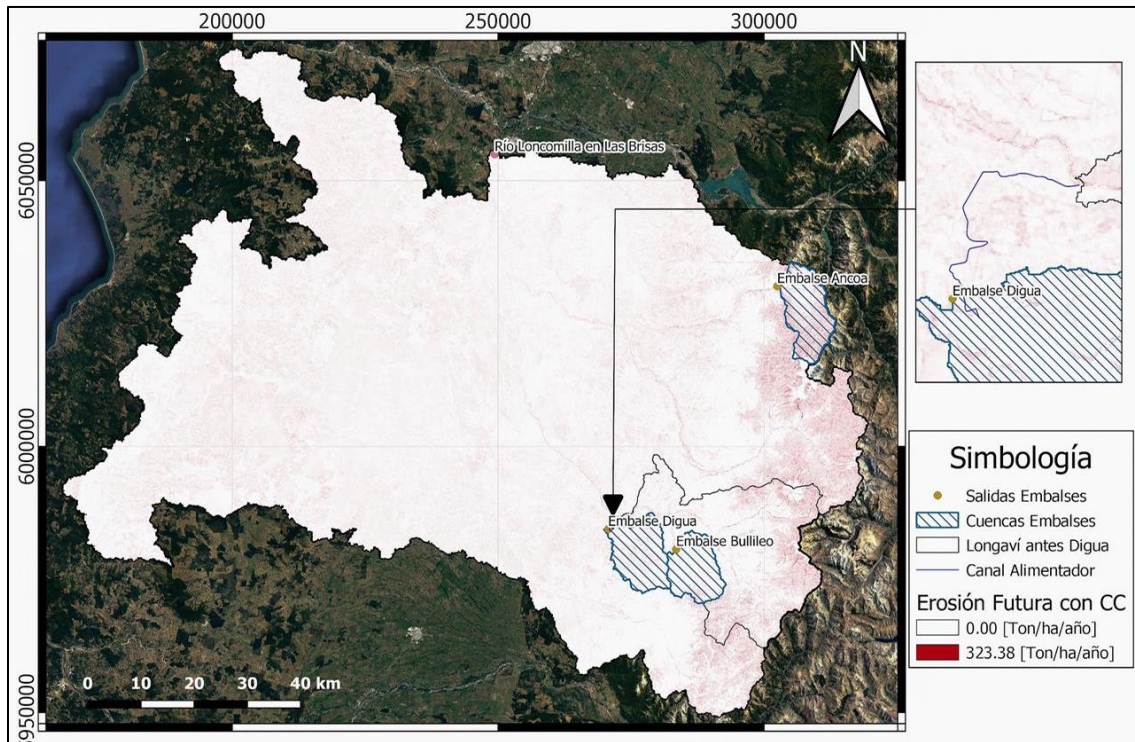


Figura 5.20: Mapa de Erosión para el escenario RCP 2.6 para Río Loncomilla en Las Brisas.



**Figura 5.21: Mapa de Erosión para el escenario RCP 8.5 para Río Loncomilla en Las Brisas.**

A diferencia de la metodología seguida para la cuenca del Río Tinguiririca Bajo Los Briones, en la cuenca del Loncomilla se estudiaron los embalses que existen en ésta. Por parte de los embalses, se consideraron tres, correspondientes al embalse Bullileo, Digua y Ancoa, donde los resultados obtenidos por RUSLE para las cuencas que delimitan estos no se consideran, dado que el material queda atrapado en el embalse y no se encontró información acerca de prácticas de limpieza del fondo, por lo cual se asume que corresponde a un lavado manual, donde existen camiones que trasladan los sedimentos acumulados y no se desechan directamente en el río. Considerando lo anterior, se llega a que el material erosionado corresponde a:

**Tabla 5.4: Resultados RUSLE en ambos Escenarios sin considerar embalses.**

	Escenario Actual	Escenario RCP 2.6	Escenario RCP 8.5
Resultados RUSLE [Ton/año]	3,186,192.67	3,254,622.38	3,399,451.86

**Tabla 5.5: Erosión Neta de la Cuenca en ambos Escenarios.**

Área Cuenca sin Embalses [km <sup>2</sup> ]	9,581.70
SDR USDA [-]	0.19
Erosión Neta Actual [Ton/año]	592,766.33
Erosión Neta RCP 2.6 [Ton/año]	605,497.15
Erosión Neta RCP 8.5 [Ton/año]	632,441.54
Variación RCP 2.6 [%]	2.15
Variación RCP 8.5 [%]	6.69



### 5.2.3.- Río Itata en Coelemu.

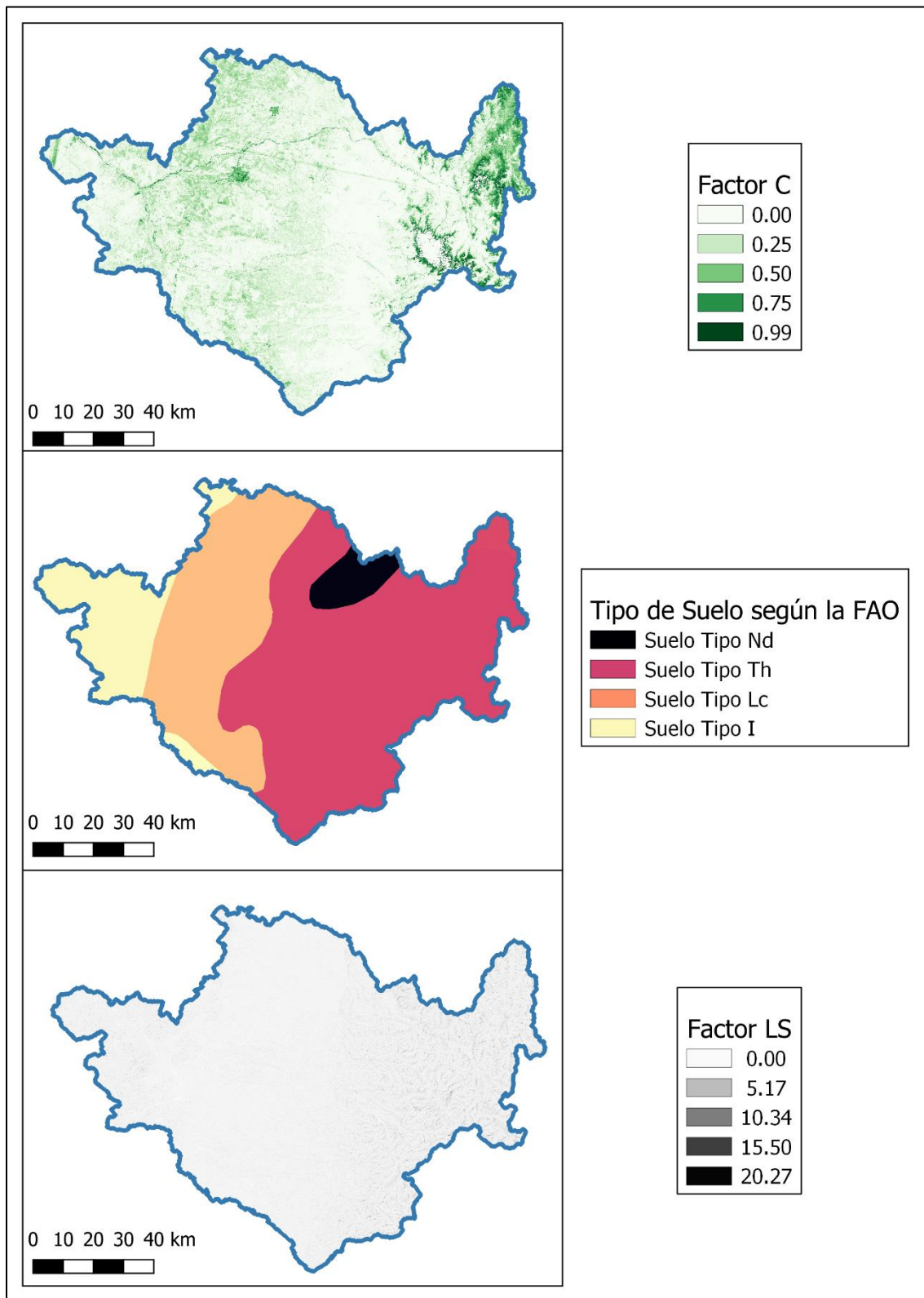


Figura 5.22: Resultados Capas C, K y LS para Río Itata en Coelemu.

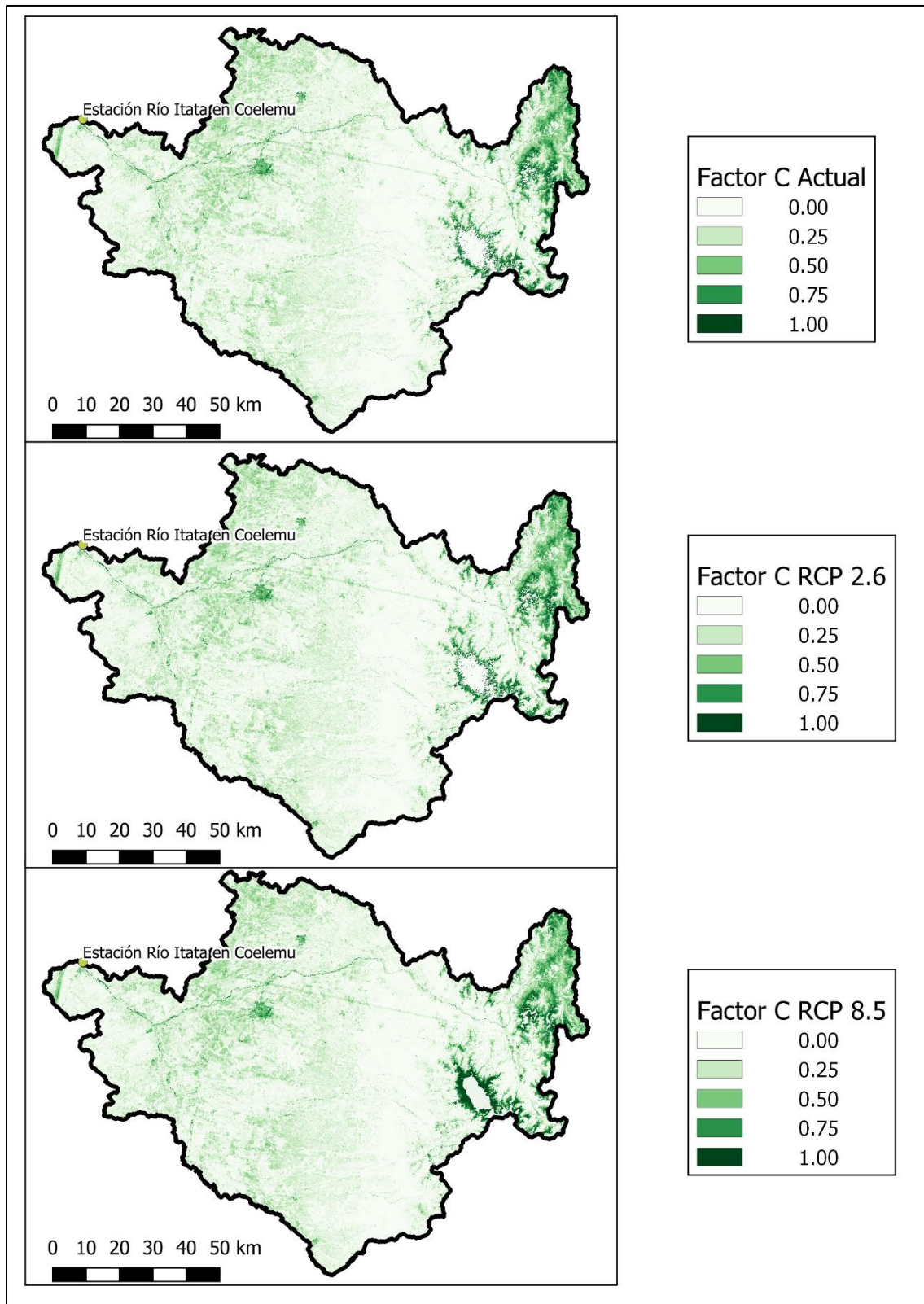
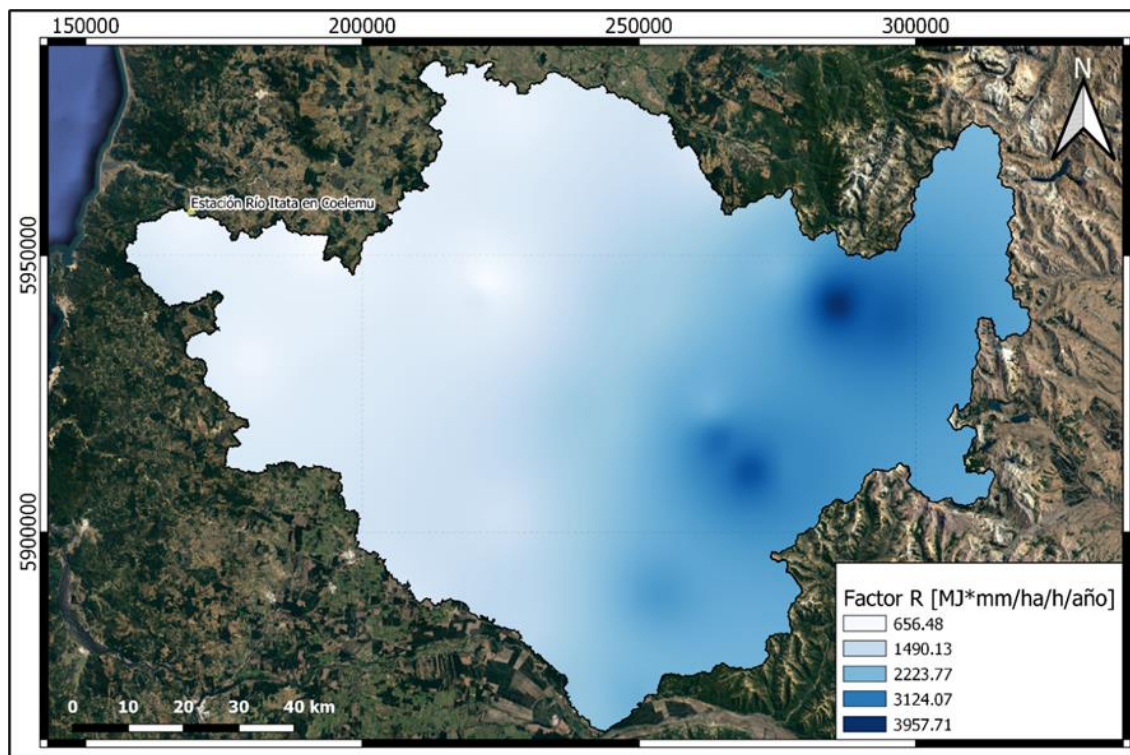
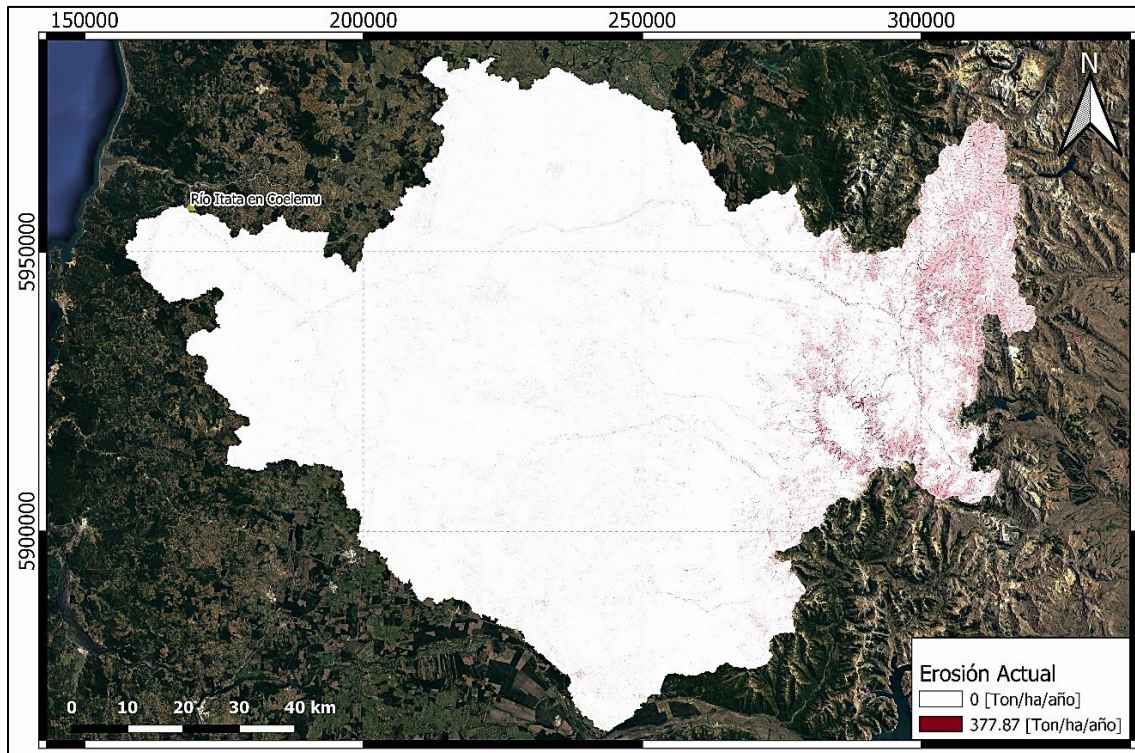


Figura 5.23: Resultados Capa C para el Escenario Actual, RCP 2.6 y RCP 8.5 para Río Itata en Coelemu.

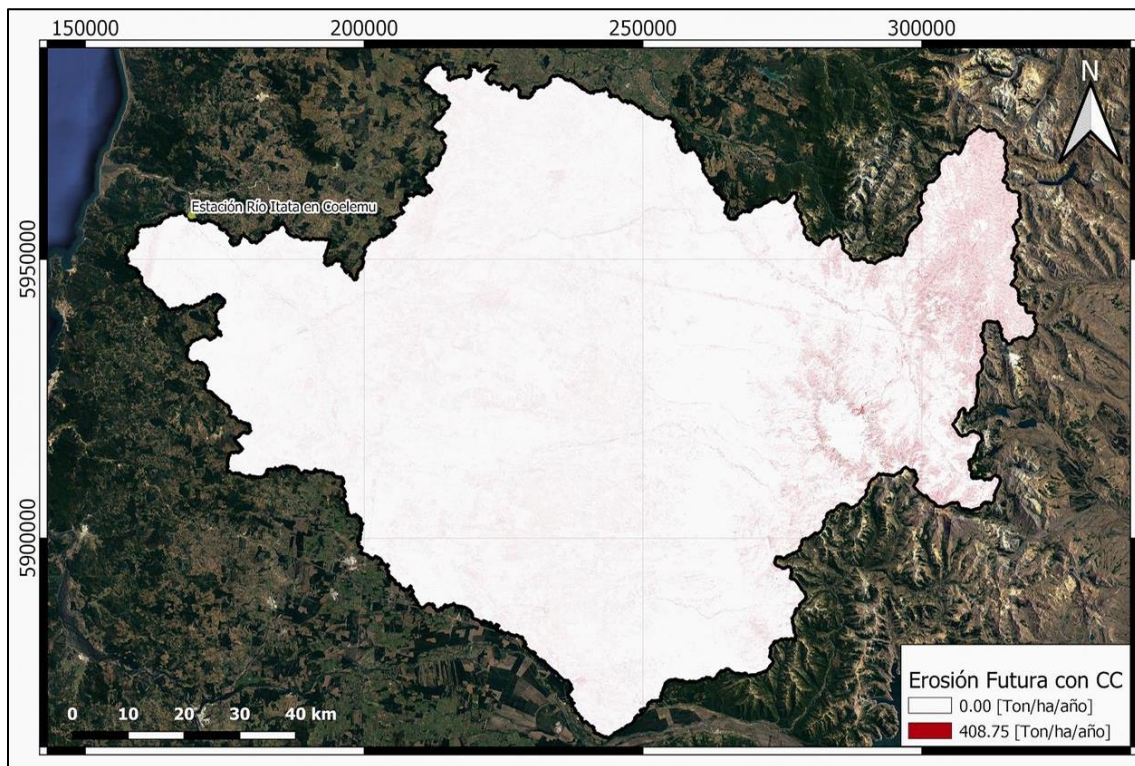


**Figura 5.24: Resultados Capa R para el Escenario Actual para Río Itata en Coelemu.**

Para el escenario RCP 2.6, el mínimo corresponde a 651.39 [MJmm/ha/h/año] y el máximo a 3,922.41 [MJmm/ha/h/año]. Por cuanto al escenario RCP 8.5, el mínimo es de 644.562 [MJmm/ha/h/año] y el máximo corresponde a 3,881.30 [MJmm/ha/h/año].



**Figura 5.25: Mapa de Erosión para la Situación Actual para Río Itata en Coelemu.**



**Figura 5.26: Mapa de Erosión para el escenario RCP 2.6 para Río Itata en Coelemu.**

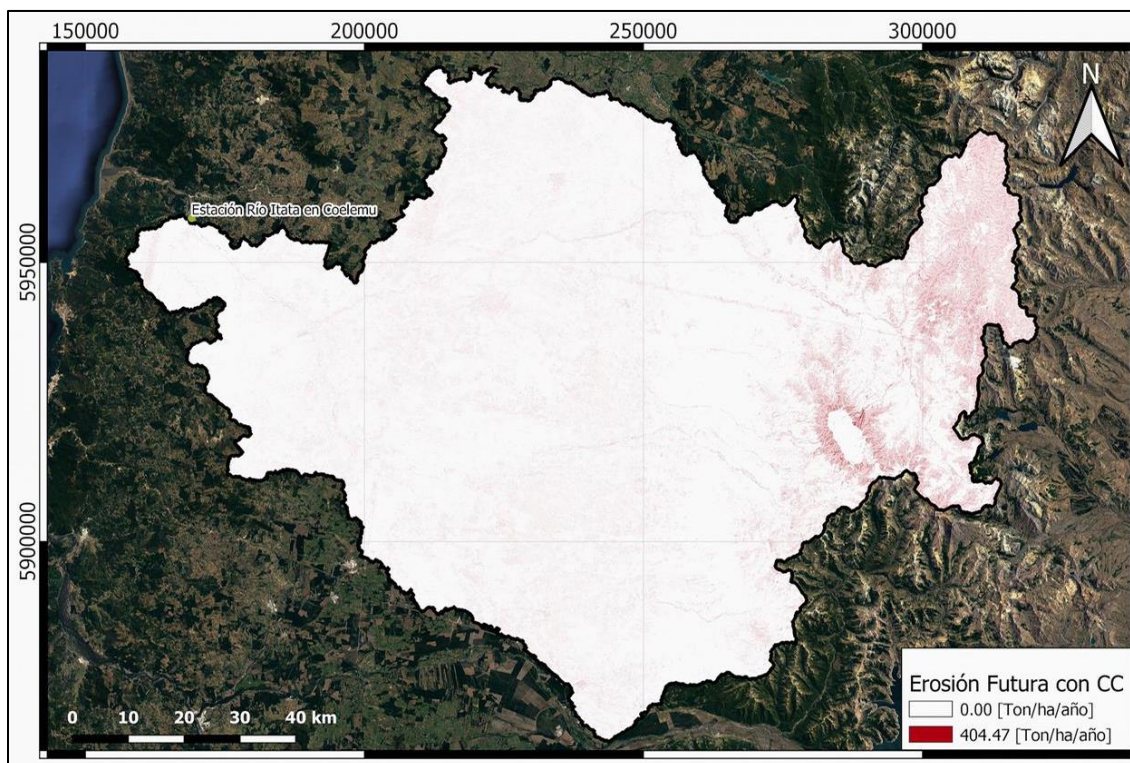


Figura 5.27: Mapa de Erosión para el escenario RCP 8.5 para Río Itata en Coelemu.

Tabla 5.6: Resultados RUSLE en ambos Escenarios.

	Escenario Actual	Escenario RCP 2.6	Escenario RCP 8.5
Resultados RUSLE [Ton/año]	7,619,901.78	7,880,885.84	9,080,604.96

Tabla 5.7: Erosión Neta de la Cuenca para ambos Escenarios.

Área Cuenca [km <sup>2</sup> ]	10,402.20
SDR USDA [-]	0.18
Erosión Neta Actual [Ton/año]	1,404,868.83
Erosión Neta RCP 2.6 [Ton/año]	1,452,986.04
Erosión Neta RCP 8.5 [Ton/año]	1,674,176.29
Variación RCP 2.6 [%]	3.43
Variación RCP 8.5 [%]	19.17

#### 5.2.4.- Análisis de Resultados.

Como se aprecia en los resultados de la capa C, se puede notar claramente el curso de los ríos, lo cual se tiene dado que en las riberas se presentan bancos de sedimentos que no tienen vegetación, lo cual es potencialmente erosionable al momento de existir una crecida del río o precipitaciones. Es importante indicar que los valores mayores de esta capa se presentan en el sector cordillerano, dado que al tener climas extremos, menor es la capacidad de que la vegetación sobreviva, por lo que mayor es el potencial erosivo.

En cuanto a la variabilidad que se tiene dado el efecto del cambio climático, en el escenario RCP 2.6 es poco visible su impacto, dado que al no subir tanto la temperatura, el sector cordillerano que cambia de nieve a suelo sin vegetación es poco, mientras que en el RCP 8.5, si se pueden apreciar sus efectos. El mayor efecto del cambio puede apreciarse en la Figura 5.12, dado que al ser la cuenca del Tinguiririca, que es la de menor superficie, mayor es el enfoque que puede realizarse.

Por parte de la Capa K, solo se muestra el tipo de suelo, mientras que los valores de la capa asociados a cada suelo se presentan en el Anexo B. Como se aprecia, los tipos de suelo abarcan bastante área de la cuenca, lo cual no necesariamente corresponde a la realidad, dado que pueden existir suelos que la FAO clasifica como un tipo, pero pueden tener características distintas. Además, hay que destacar que la extensión del archivo de la FAO es de carácter global (escala 1:5,000,000), por lo cual no se tiene una discretización espacial pequeña como las otras capas, lo cual probablemente trae consigo errores a la hora de calcular la erosión de la cuenca.

Respecto a la Capa LS, los resultados son consistentes con lo visto en Google Earth, dado que se aprecia que en el valle los valores que se tiene son bastantes menores a los que se presentan en el sector cordillerano para cada una de las cuencas.

En cuanto a la Capa R, tal como se dijo anteriormente, la variación que se tiene es casi nula, pero se debe indicar que es dado que se toma un valor promedio anual, puesto que si se analiza mes a mes, las variaciones son mucho mayores.

Otro punto interesante para estudiar en la Capa R corresponde a la interpolación que se realizó, dado que claramente se puede ver la influencia que tienen las estaciones presentes en la cuenca en esta capa, lo cual a la hora de obtener la erosión de la cuenca puede presentar problemas. Esto es apreciable en las Figuras 5.11, 5.18 y 5.24, donde se ve que existen círculos alrededor de las estaciones seleccionadas.

Sobre la erosión potencial que se tiene en la cuenca, los valores mayores que se presentan, en las tres cuencas, se tienen en el sector cordillerano, lo que se debe a los diferentes factores referentes a las capas que se utilizan, tales como una mayor pendiente, menor cobertura vegetal y mayores precipitaciones. Esto indica que en su mayoría el sedimento que acarrearán los ríos por el lavado de cuenca se asocia a la cordillera, lugar donde se encuentra el inicio de estos. Cabe recalcar el hecho de la gran cantidad de sedimentos que puede producir la cuenca asociada al río Tinguiririca, ya que a pesar de ser una cuenca diez

veces menor que la del Loncomilla, la diferencia entre ambas no supera el millón de toneladas por año producidas.

Al comparar el escenario actual con los futuros, se tiene para el RCP 2.6 que la cuenca del Tinguiririca, Loncomilla e Itata se ve aumentado el aporte por lavado de cuenca. Los aumentos corresponden a un 4.83, 2.15 y 3.43 [%], respectivamente. Por parte del escenario RCP 8.5, se tiene la misma tendencia, con un aumento del 16.03, 6.69 y 19.17 [%], respectivamente, en caso de un orden de las tres cuencas de norte a sur. Esto último se encuentra asociado a que existe una disminución de las precipitaciones bastante baja a nivel anual, pero por otra parte, aumenta la cota de la línea de nieves (mayor aumento para el escenario RCP 8.5), por lo que tiene sentido el hecho de que se tenga un mayor aumento de sedimentos para el escenario RCP 8.5.

### **5.3.- Gasto Sólido de Fondo.**

#### **5.3.1.- Curvas Granulométricas.**

Al realizar la búsqueda por la web, se encontraron dos estudios que, si bien no se encuentran específicamente en el punto de interés, se ubican en el río a analizar. Esto último se asume dada la incapacidad de obtener las curvas granulométricas en terreno por la crisis sanitaria. Estos dos estudios se tienen para la cuenca del Tinguiririca y del Itata, donde el primero (asociado a la cuenca del Tinguiririca) corresponde al trabajo de título realizado por Balbontín (2013), mientras que para la cuenca del Itata se utiliza un estudio de enrocado hecho por CELCO S.A en el año 2004.

Por parte de la cuenca del Loncomilla, se realiza una campaña de terreno, con el objetivo de obtener fotografías para obtener la curva granulométrica con el programa mencionado en la metodología. En el Anexo C, se presentan las imágenes utilizadas para obtener la curva granulométrica de este río.

En las Figuras 5.28, 5.29 y 5.30 se presentan las curvas granulométricas asociadas a cada uno de los ríos.

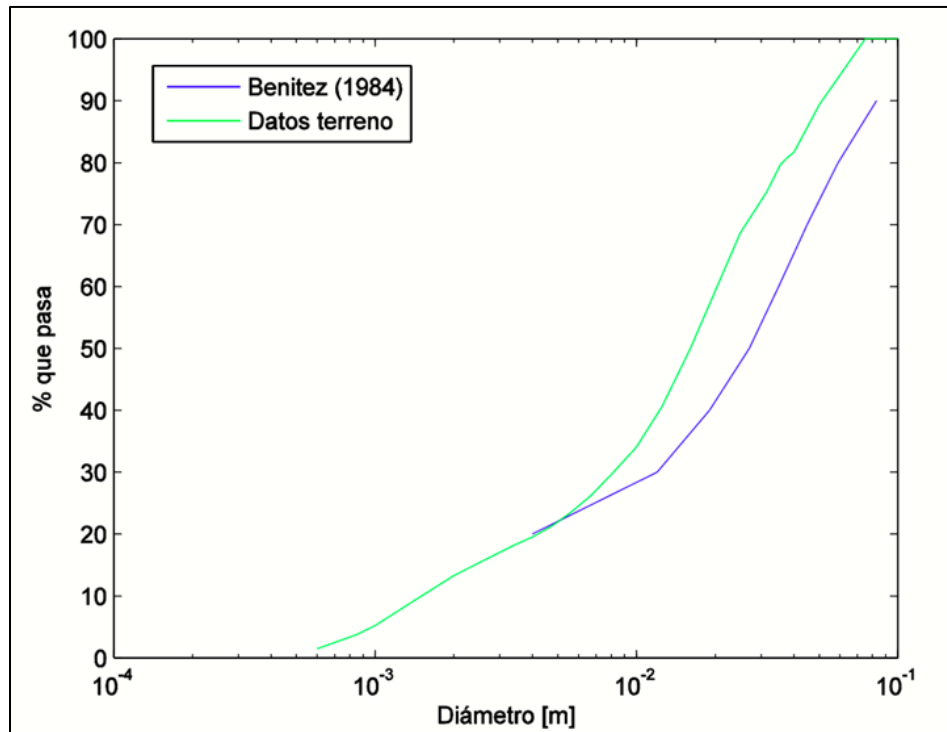


Figura 5.28: Curva granulométrica asociada al Río Tinguiririca. (Fuente: Balbontín, 2013)

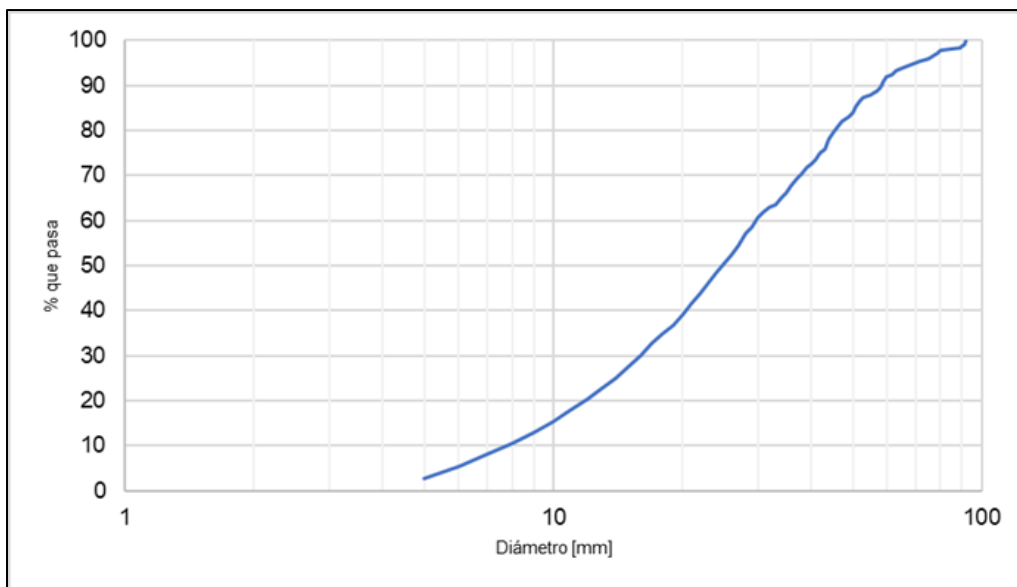


Figura 5.29: Curva granulométrica asociada al Río Loncomilla.





Figura 5.30: Curva granulométrica asociada al Río Itata. (Fuente: CELCO S.A., 2004)

En la Figura 5.29, se aprecia que la curva granulométrica se corta para los valores menores a 5 [mm], donde el tipo de sedimentos que se presenta bajo este diámetro corresponde a arenas, arcillas y limos, los cuales no son capaces de identificar ya que son demasiado pequeños para que sean reconocidos por el programa utilizado. Por parte de las otras dos curvas granulométricas, dado que se tienen resultados que involucran un estudio de laboratorio, se puede obtener el porcentaje de arenas que presenta, lo cual es conveniente para luego calcular el valor del GSF.

Respecto a los diámetros característicos, estos se presentan cada un 10 [%], donde cabe destacar que para la curva granulométrica asociada al río Itata, los valores de los diámetros son de un carácter estimativo dada la imagen, mientras que para los otros dos se contaba con información que hizo la tarea más sencilla.

Tabla 5.8: Diámetros característicos.

	Río Tinguiririca	Río Loncomilla	Río Itata
d <sub>10</sub> [m]	0.0016	0.0080	0.0005
d <sub>20</sub> [m]	0.0040	0.0120	0.0010
d <sub>30</sub> [m]	0.0080	0.0170	0.0056
d <sub>40</sub> [m]	0.0120	0.0210	0.0160
d <sub>50</sub> [m]	0.0160	0.0250	0.0270
d <sub>60</sub> [m]	0.0200	0.0300	0.0400
d <sub>70</sub> [m]	0.0270	0.0380	0.0500
d <sub>80</sub> [m]	0.0360	0.0460	0.0600
d <sub>90</sub> [m]	0.0500	0.0590	0.0800
d <sub>100</sub> [m]	0.0740	0.0920	0.1500

### 5.3.2.- Obtención GSF.

Para obtener las alturas necesarias para el cálculo del GSF, se utilizan los datos obtenidos de la DGA para la estimación del GSS Rutinario, dado que en este se presenta una columna con datos de alturas de escurrimientos y su caudal asociado. Las relaciones entre altura y caudal para cada una de las estaciones se presentan en el Anexo D, además de las alturas asociadas a cada mes tanto para el período actual como el futuro.

La pendiente por utilizar para cada cuenca se calcula tal como se propone en la metodología, teniendo un valor de 4.00, 2.00 y 0.44 [%] para la cuenca del Tinguiririca, Loncomilla e Itata respectivamente. Como se aprecia, la menor pendiente que se tiene es la del río Itata, la cual es el río más cercano al Océano Pacífico, es decir, más cercano a la desembocadura. Por parte del esfuerzo de corte, se asume un escurrimiento normal en todos los ríos, por lo que se utiliza la fórmula 2.10

Dado que no se tenía el valor correspondiente a las arenas para el río Loncomilla, se decide utilizar un porcentaje de arena correspondiente al 15 [%]. Esto puesto que el río Itata presentaba valores similares respecto al porcentaje de arena y corresponde a una cuenca de igual magnitud.

En las Figuras 5.31, 5.32 y 5.33, se muestran la variación obtenida por unidad de ancho para cada una de las cuencas, tanto para el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5.

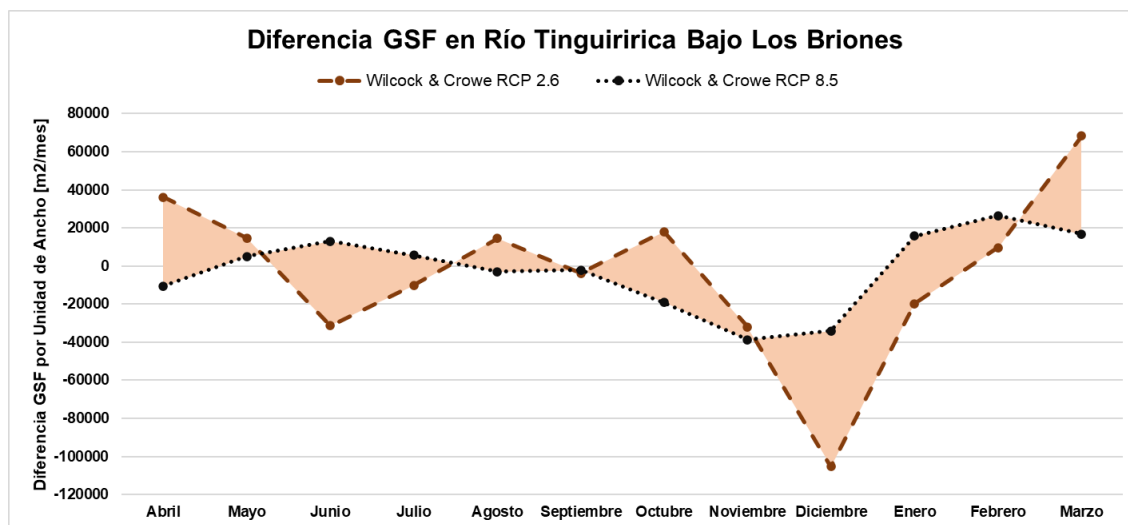


Figura 5.31: Comparación de la diferencia de GSF en la estación Río Tinguiririca Bajo Los Briones para caudales en el futuro y presente.

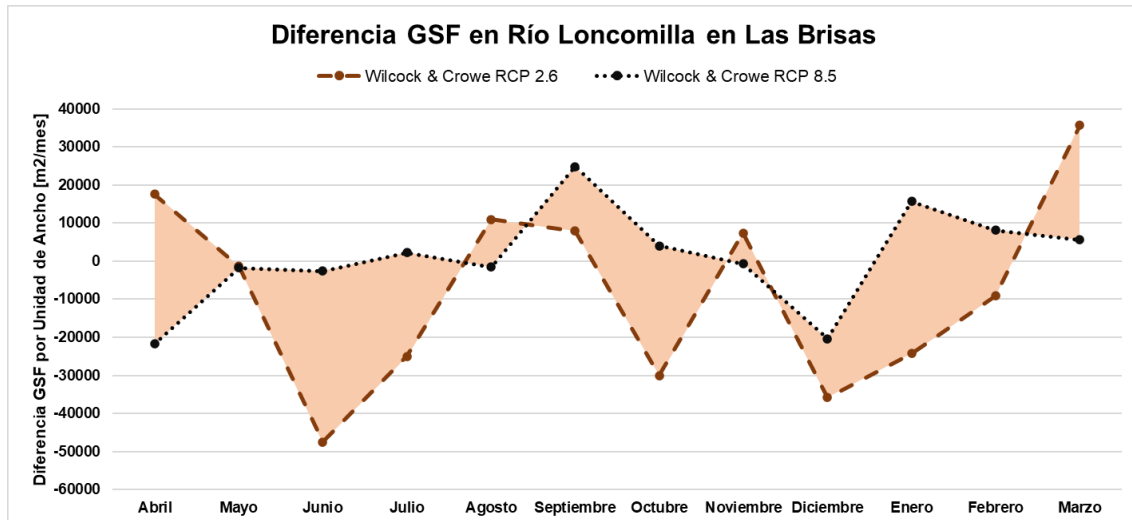


Figura 5.32: Comparación de la diferencia de GSF en la estación Río Loncomilla en Las Brisas para los caudales en el futuro y presente.

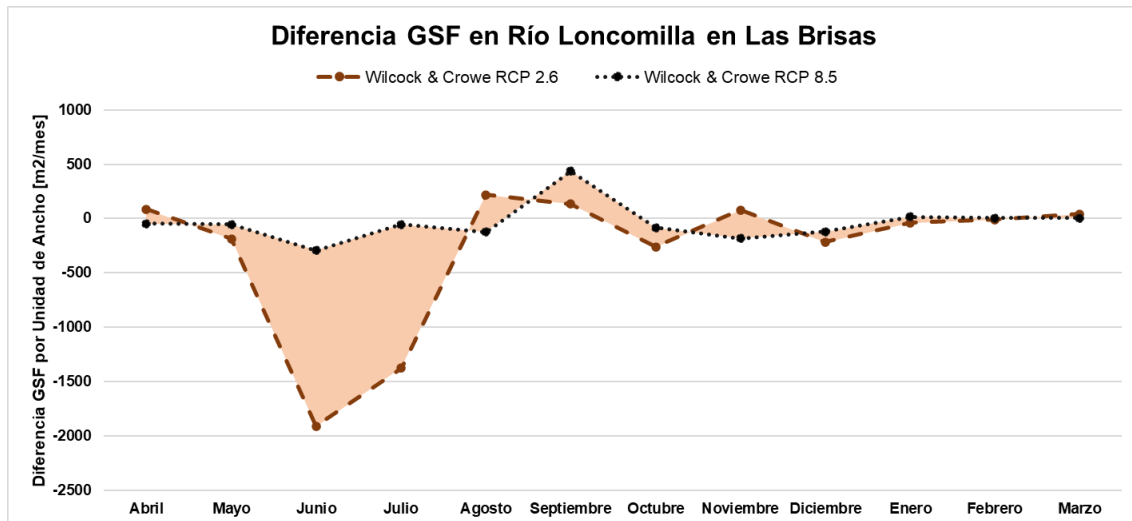


Figura 5.33: Comparación de la diferencia de GSF en la estación Río Itata en Coelemu para los caudales en el futuro y presente.

Como se aprecia en las figuras anteriores, se aprecia que nuevamente el peor escenario corresponde al RCP 2.6, dado que las variaciones en el caudal son mayores para el RCP 8.5. De igual forma, se puede indicar que los escenarios no presentan una relación directa, es decir, no hay un escenario que todo el año sea mayor o menor que el otro, por lo que existe una gran variación entre ambos escenarios.

Cabe destacar que solo se utiliza el método de Wilcock & Crowe, dado que este corresponde a un método que incluye el efecto de sobreexposición y escondimiento, cosa que otros métodos explicados en el Capítulo 2 de este trabajo no incluyen.

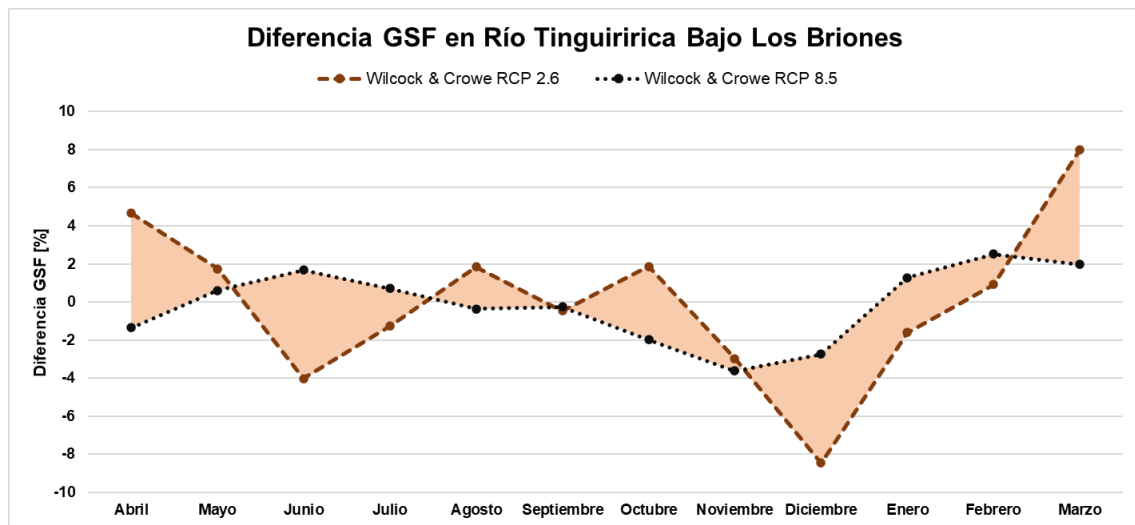
En cuanto a la cuenca del río Tinguiririca, se tiene que es la que presenta mayores reducciones del GSF por unidad de ancho respecto a las cuencas en estudio, teniendo una disminución de hasta 105,000 [m2/mes] para el escenario RCP 2.6, la cual se tiene en el mes

de diciembre, mientras que en el escenario RCP 8.5 la mayor reducción corresponde al mes de noviembre, con una reducción de 38,755 [m2/mes].

Por parte de la cuenca del río Loncomilla, en el escenario RCP 2.6, la mayor reducción se tiene en el mes junio, con un valor de 47,500 [m2/mes], mientras que en el RCP 8.5 esta se tiene en el mes de diciembre, teniendo una reducción de 20,350 [m2/mes].

Respecto a la cuenca del río Itata, la mayor disminución en el escenario RCP 2.6 se tiene en el mes de junio, al igual que para el río Loncomilla, siendo esta disminución de 1910 [m2/mes], y para el escenario RCP 8.5 la mayor disminución sería en el mes de junio igualmente, con un valor de 290 [m2/mes].

Si bien se puede apreciar en las Figuras 5.31 5.32 y 5.33 las reducciones por unidad de ancho en cada río, es importante ver el porcentaje de pérdida para poder hacer un análisis más concreto. Teniendo lo anterior en cuenta, se presentan las Figuras 5.34, 5.35 y 5.36.



**Figura 5.34: Diferencia porcentual para la estación Río Tinguiririca Bajo Los Briones entre el caudal del presente y futuro.**

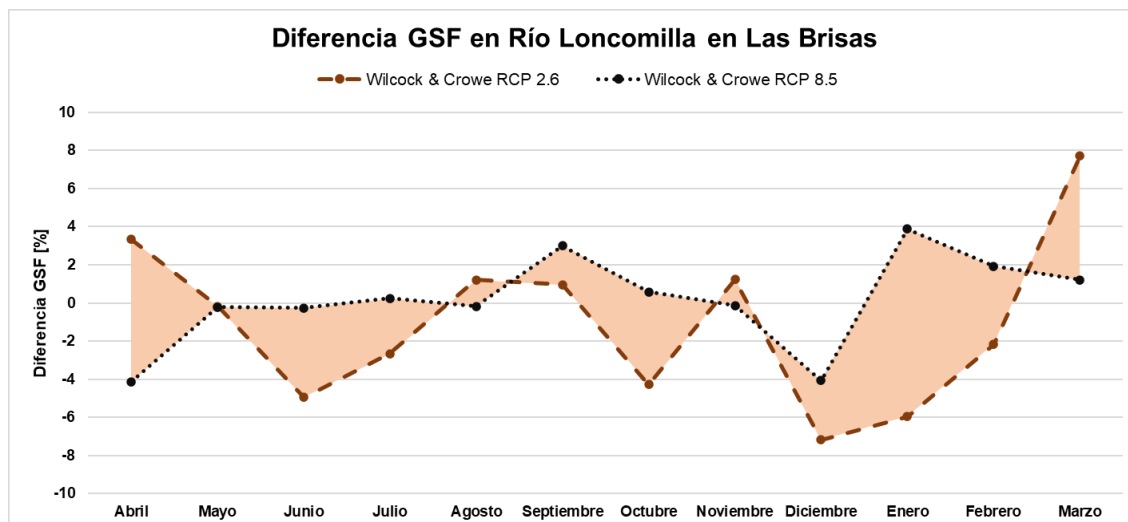


Figura 5.35: Diferencia porcentual para la estación Río Loncomilla en Las Brisas entre el caudal del presente y futuro.

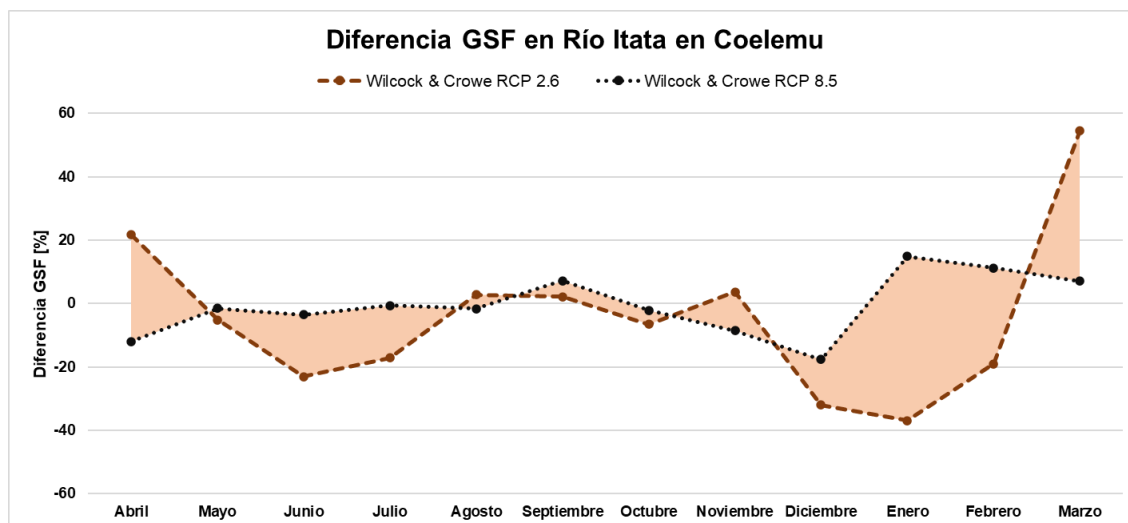


Figura 5.36: Diferencia porcentual para la estación Río Itata en Coelemu entre el caudal del presente y futuro.

De las figuras presentadas anteriormente, se puede ver que tanto la Figura 5.31 y 5.32 siguen la misma distribución que las Figuras 5.34 y 5.35, respectivamente. En cambio, la Figura 5.33 al compararla con la Figura 5.36 presenta diferencias para los meses de primavera y verano, ya que en la Figura 5.33 casi no se aprecian cambios, mientras que en la Figura 5.36 se aprecia que existirán cambios importantes, más que nada para el escenario RCP 2.6, dado que tiene peak con disminuciones de un 36.96 [%] (en enero) hasta aumentos de un 54.68 [%] (en marzo).

En promedio, a nivel anual, el escenario RCP 2.6 indica una disminución del GSF en un 0.37, 1.17 y 8.36 [%] para las cuencas del río Tinguiririca, Loncomilla e Itata, respectivamente. Por parte del escenario RCP 8.5, las variaciones que se tienen a nivel anual corresponden a -0.22, 0.15 y -1.21 [%] en el mismo orden anterior. Las mayores disminuciones, al igual que para el GSS, se tienen para el escenario RCP 2.6, puesto que es donde más varía el caudal.

Otro punto importante corresponde a que no necesariamente los valores de reducción del GSF que se presentan, se tengan en la realidad, puesto que el cambio climático presenta bastante incertidumbre. Dado esto es que se indica que a futuro, los valores de variación pueden estar entre ambos escenarios (área sombreada), los cuales se encuentran delimitados por los escenarios estudiados.

## Capítulo 6 : Conclusiones y Recomendaciones.

### 6.1.- Conclusiones.

En base a los resultados obtenidos, tanto el análisis de estos como de la recopilación de antecedentes se llega a las siguientes conclusiones:

- Las proyecciones para el escenario futuro, que corresponde al período entre el año 2030 y 2060, muestran que los caudales de las cuencas de la zona centro-sur del país se verían reducidas, donde el porcentaje de pérdida varía según la cuenca que se analice. Esto trae consigo repercusiones a la capacidad de transporte de sedimentos que tienen los ríos, dado que existen relaciones entre el caudal y el gasto sólido.
- En promedio, a nivel anual, por parte del escenario RCP 2.6 se espera una reducción del GSS (por medio de las regresiones obtenidas) de un 23.43 [%] para el río Tinguiririca, un 13.96 [%] en el río Loncomilla y un 12.42 [%] para el río Itata. Por parte del escenario RCP 8.5, las disminuciones son de un 12.89, 2.89 y 3.72 [%] en el mismo orden anterior.
- El aporte de sedimentos por el lavado de cuenca se verá afectado a futuro. En la cuenca del río Tinguiririca, se tendrá un aumento del 4.83 y 16.03 [%] para el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5, respectivamente. Por parte de la cuenca del río Loncomilla, en el escenario RCP 2.6 se pronostica un aumento del 2.15 [%], mientras que el escenario RCP 8.5 este corresponde al 6.69 [%]. Respecto a la cuenca del Itata, se tendrá un aumento del 3.43 [%] para el escenario RCP 2.6, y de un 19.17 [%] para el RCP 8.5. Esto indica que a futuro, bajo el escenario RCP 8.5, considerando las variaciones de temperatura y precipitación de este trabajo, el aporte del lavado de cuenca se verá aumentado para el período 2030 - 2060.
- Por parte del GSF, el escenario RCP 2.6 indica disminuciones del 0.37, 1.17 y 8.36 [%] para las tres cuencas ordenadas de norte a sur, respectivamente. Por otra parte, el escenario RCP 8.5 indica variaciones del -0.22, 0.15 y -1.21 [%] para el río Tinguiririca, Loncomilla e Itata, respectivamente.
- Por medio de las estadísticas de las estaciones, al aplicar los valores de caudales a futuro, se espera una gran disminución del gasto sólido suspendido. Sin embargo, al aplicar el método RUSLE/SDR, existe un aumento de los sedimentos por lavado de cuenca. Dado lo anterior, se tiene que para efectos de estudio, no es posible estimar los valores a futuro del gasto sólido suspendido por medio de las estaciones sedimentométricas, sino que se debe estudiar la estimación por métodos que contemplen diversas características de la cuenca, tal como el usado en este trabajo.
- Dado que existirá un aumento de los sedimentos por lavado de cuenca y una disminución del caudal, la concentración de sedimento fino que transportan los ríos se verá aumentada a futuro.
- El aporte del sedimento en el mar se verá afectado, dado que el gasto sólido variará. Esto es válido para la cuenca del Loncomilla e Itata, puesto que el río Tinguiririca desemboca en el embalse Rapel, el cual actúa como un control.
- Si bien fue posible calcular variaciones del GSS y GSF para las tres cuencas estudiadas, no se pudo obtener una correlación en cuanto a la disminución o aumento que pueda ser utilizada para cuencas que no fueron seleccionadas en este estudio.

Esto indica lo complejo del problema y que no solamente se debe tener en cuenta la relación entre el caudal y gasto sólido, sino que se deben incluir más factores, como la cobertura vegetal, la capacidad de producir sedimentos de la cuenca y uso de suelo futuro en la cuenca (planes de desarrollo).

- Cabe destacar que los aumentos y disminuciones obtenidas son valores promedio, por lo que no necesariamente representen lo que se vea a futuro para cierto año, sino que es el promedio esperado para el período 2030 – 2060.

## **6.2.- Recomendaciones.**

A medida que se fueron desarrollando los resultados, y junto con el análisis de estos, se pueden indicar las siguientes recomendaciones para futuros trabajos de este estilo:

- Realizar en una estimación propia de la variación del recurso hídrico en el lugar de estudio, de tal forma que se obtenga un producto más preciso para la zona.
- Utilizar las regresiones obtenidas por las estaciones de la DGA para validar los resultados del método RUSLE/SDR y no utilizarlas para proyectar una variación del gasto sólido suspendido, ya que las estaciones solo presentan una relación del caudal con el gasto sólido de fondo.
- Por parte del método RUSLE, se recomienda hacer un análisis mensual, dado que si bien no existe una gran disminución de las precipitaciones a nivel anual bajo las simulaciones dadas por CORDEX, si son diferente mes a mes. Esto último dado que se debería estudiar el efecto en la línea de nieves mensualmente, ya que ésta es variable durante el año, y con los cambios en las precipitaciones mensuales, pueden cambiar los valores obtenidos en este trabajo.
- Respecto al valor SDR, no solo utilizar un valor general como el utilizado en este trabajo, si no que crear otra capa, tal como hace el modelo InVEST. Esto dado que al presentar un valor por píxel, no se generaliza toda la cuenca con un mismo número, sino que se obtiene un valor correspondiente según las características presentes en el píxel.



## Capítulo 7 : Bibliografía.

Balbontín, J.E. 2013. Modelación de la sedimentación en el Embalse Rapel: Delta y Corriente de Turbidez. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Bonilla, C.A., Reyes, J.L. & Magri, A. 2010. Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Central Chile. Chilean Journal of Agricultural Research, 70(1): 159 – 169.

Bonilla, C.A. & Vidal, K.L. 2011. Rainfall erosivity in Central Chile. Journal of Hydrology, 410(2011): 126 – 133.

CELCO S.A. 2004. Proyecto Celulosa Itata, Proyecto Defensas Fluviales Bocatoma CFI Itata para presentación a la DOH.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (s.f). Simulaciones Climáticas Regionales. Recuperado el 6 de mayo de 2021 de <http://www.cr2.cl/simulaciones-climaticas-regionales/>

DeBano, L.F., Ffolliott, P.F. & Baker, M.B Jr. 1996. Fire Severity Effects on Water Resources. Pp. 77 – 84 in: A Symposium Proceedings “Effects of Fire on Madrean Province Ecosystems”. USDA Forest Service, General Technical Report RM-GTR-289.

Dibike, Y., Shakibaenia, A., Eum, H-I., Prowse, T. & Droppo, I. 2018. Effects of projected climate on the hydro-dynamic and sediment transport regime of the lower Athabasca River in Alberta, Canada. River Research and Applications, 34(5): 417 – 429. Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/rra.3273>

DGA, Dirección General de Aguas. 1999. Manual de Terreno y Centros de Filtrado. Santiago: Centro de Información Recursos Hídricos, Área de Documentación.

DGA, Dirección General de Aguas. 2004a. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Itata. Santiago: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

DGA, Dirección General de Aguas. 2004b. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Rapel. Santiago: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

DGA, Dirección General de Aguas. 2005. Evaluación de los recursos hídricos superficiales de la cuenca del Río Maule. Santiago: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

DGA, Dirección General de Aguas. 2014. Glaciares de Chile. Santiago: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas.

DGA, Dirección General de Aguas. 2017. Actualización del Balance Hídrico Nacional. SIT N° 417. Santiago: Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas. Elaborado por Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

Ferro, V., Porto, P., Yu, B. 1999. A comparative study of rainfall erosivity estimation for Southern Italy and southeastern Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 44(1): 3 – 24.

“GISS Surface Temperature Analysis (v4).” NASA Goddard Institute for Space Studies. Visitado por última vez en agosto 04, 2020. [https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v4/](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/)

Gomi, T., R. Dan Moore. & M. Hassan. 2005. Suspended Sediment Dynamics in Small Forest Streams of the Pacific Northwest, *Journal of the American Water Resources Association*, 41(4): 877 – 898.

ICONA. 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. 39 p. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.

ICONA. 1991. La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, Presente y Futuro. *Ecología*, 5: 13 – 50.

Inman, D.L., Jenkins, S.A. 1999. Climate Change and The Episodicity of Sediment Flux of Small California Rivers. *The Journal of Geology*, 107: 251 – 270.

IPCC. 2013. Cambio Climático 2013, Bases Físicas.

IPCC. 2014. Cambio Climático 2014, Informe de Síntesis, Ginebra, Suiza.

Iroume, A. 1990. Assessment of runoff and suspended sediment yield in a partially forested catchment in Southern Chile. *Water Resources Research*, 26(11): 2637 – 2642.

Julien, P.Y. 2002. *River Mechanics*. Cambridge University Press.

Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y., & Wang, H. 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impacts on the cryosphere. *Earth-Science Reviews* 210 (2020), Article 103346.

Lu, X. X., Ran, L. S., Liu, S., Jiang, T., Zhang, S. R., & Wang, J. J. 2013. Sediment loads response to climate change: A preliminary study of eight large Chinese rivers. *International Journal of Sediment Research*, 28(1): 1 – 14.

Menares, A. Karina, López, A. 2012. Análisis de muestreos rutinarios e integrados de sedimentos en suspensión: Caso de cuencas en Chile central. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.

Ministerio del Medio Ambiente. 2015. Plan Nacional de Adaptación Al Cambio Climático.

Moore, I.D., Nieber, J.L. 1989. Landscape Assessment of Soil Erosion and Nonpoint Source Pollution. *Journal of the Minnesota Academy of Science (USA)*, 55: 18 – 25.

Naciones Unidas. 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Neitsch, S.L., Arnold, J.R., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas Agricultural Experiment Station.

Niño, Y. 2019. Apuntes Curso Transporte Hidráulico de Sólidos, Mecanismo del Transporte de Sedimentos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Sarricolea, P., Herrera, MJ. & Meseguer-Ruiz, O. 2017. Climatic regionalization of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2): 66 – 73.

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D., and Douglass, J. 2018. InVEST 3.7.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, TheNature Conservancy, and World Wildlife Fund.

Tamburrino, A., Niño, Y. 2013. Apuntes Curso Transporte Hidráulico de Sólidos, Propiedades de los Sedimentos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Van der Knifjj, M., Jones, R.J.A, Montanarella, L. 1999. Soil erosion risk in Italy. EUR19022 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg. 54p.

Vicuña, G., Garreaud, R.D., & McPhee, J. 2011. Climate Change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105: 469 – 488.

Walling, D. & Fang, D. 2003. Recent Trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39: 111 – 126.

Williams, J.R. 1995. Computer models of watershed hydrology, Chapter 25: The Epic model. Water Resources Publications, 909 – 1000.

Wischmeier, W. H. & Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Science, US Department of Agriculture Handbook, No. 537, Washington DC.

Wyss, C. R., D. Rickenmann, B. Fritschi, J. M. Turowski, V. Weitbrecht, E. Travaglini, E. Bardou, & R. M. Boes. 2016. Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone

bedload monitoring system: 2. Application to field sites with direct bed load samples, *Water Resour. Res.*, 52, 7760–7778. Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/2016WR019283>

Zhou, Y., Xu, Y., Xiao, W., Wang, J., Huang, Y., & Yang, H. 2017. Climate Change Impacts on Flow and Suspended Sediment Yield in Headwaters of High-Latitude Regions—A Case Study in China’s Far Northeast. *Water*, 9(12): 966.

## Anexo A: Resultados GSS.

**Tabla A.1: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario actual en la cuenca “Río Tinguiririca Bajo los Briones”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	29.08	37.30	29.40	32.00	30.10	36.60
GSS Rutinario [Ton/día]	160.47	279.15	164.43	198.53	173.26	267.64
GSS Integrado [Ton/día]	284.04	494.10	291.03	351.39	306.67	473.72
GSS Integrado [Ton/mes]	8521.05	15317.23	8731.00	10893.15	9506.74	14211.55

**Tabla A.1: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario actual en la cuenca “Río Tinguiririca Bajo Los Briones”.** (Continuación)

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	55.40	75.20	117.00	113.00	71.00	38.60
GSS Rutinario [Ton/día]	672.87	1327.62	3548.22	3284.06	1168.32	301.26
GSS Integrado [Ton/día]	1190.98	2349.88	6280.34	5812.79	2067.93	533.22
GSS Integrado [Ton/mes]	36920.33	70496.55	194690.68	180196.47	57902.15	16529.89

**Tabla A.2: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 2.6 en la cuenca “Río Tinguiririca Bajo Los Briones”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	31.60	37.38	24.82	29.35	30.21	34.39
GSS Rutinario [Ton/día]	193.08	280.42	112.81	163.75	174.63	232.97
GSS Integrado [Ton/día]	341.75	496.34	199.67	289.84	309.10	412.36
GSS Integrado [Ton/mes]	10252.35	15386.57	5990.22	8984.90	9582.13	12370.91

**Tabla A.2: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 2.6 en la cuenca “Río Tinguiririca Bajo Los Briones”.** (Continuación)

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	55.81	65.72	86.16	103.04	69.68	46.08
GSS Rutinario [Ton/día]	683.86	983.85	1796.56	2674.94	1120.61	446.66
GSS Integrado [Ton/día]	1210.44	1741.41	3179.91	4734.65	1983.48	790.59
GSS Integrado [Ton/mes]	37523.55	52242.19	98577.36	146774.22	55537.57	24508.41

**Tabla A.3: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 8.5 en la cuenca “Río Tinguiririca Bajo Los Briones”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	26.59	36.16	29.37	31.09	28.34	34.60
GSS Rutinario [Ton/día]	131.55	260.49	164.01	186.14	151.52	236.17
GSS Integrado [Ton/día]	232.85	461.06	290.30	329.46	268.19	418.03
GSS Integrado [Ton/mes]	6985.43	14292.93	8708.88	10213.28	8313.95	12540.81

**Tabla A.3: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 2.6 en la cuenca “Río Tinguiririca Bajo Los Briones”. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	49.85	64.45	103.11	112.33	72.99	38.94
GSS Rutinario [Ton/día]	532.01	941.94	2679.11	3240.67	1242.48	307.24
GSS Integrado [Ton/día]	941.66	1667.23	4742.02	5735.99	2199.19	543.82
GSS Integrado [Ton/mes]	29191.52	50016.89	147002.53	177815.58	61577.30	16858.47

**Tabla A.4: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario actual en la cuenca “Río Loncomilla en Las Brisas”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	76.42	266.92	570.88	541.30	470.95	350.90
GSS Rutinario [Ton/día]	76.05	653.79	2417.20	2205.87	1736.14	1046.58
GSS Integrado [Ton/día]	190.14	1634.47	6043.00	5514.67	4340.34	2616.45
GSS Integrado [Ton/mes]	5704.11	50668.56	181290.00	170954.65	134550.57	78493.38

**Tabla A.4: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario actual en la cuenca “Río Loncomilla en Las Brisas”. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	198.46	114.58	63.92	32.30	35.56	49.57
GSS Rutinario [Ton/día]	392.69	152.67	55.94	17.29	20.41	36.13
GSS Integrado [Ton/día]	981.73	381.68	139.84	43.23	51.01	90.32
GSS Integrado [Ton/mes]	30433.75	11450.30	4335.14	1340.09	1428.40	2799.96

**Tabla A.5: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 2.6 en la cuenca “Río Loncomilla en Las Brisas”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	82.30	257.02	470.87	477.07	476.13	351.25
GSS Rutinario [Ton/día]	86.41	612.63	1735.60	1775.09	1769.09	1048.39
GSS Integrado [Ton/día]	216.03	1531.57	4339.00	4437.71	4422.72	2620.98
GSS Integrado [Ton/mes]	6481.01	47478.78	130169.86	137569.14	137104.23	78629.38

**Tabla A.5: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 2.6 en la cuenca “Río Loncomilla en Las Brisas”. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	165.67	115.42	48.18	25.41	31.86	61.16
GSS Rutinario [Ton/día]	287.86	154.58	34.40	11.45	16.89	51.85
GSS Integrado [Ton/día]	719.64	386.46	85.99	28.63	42.23	129.63
GSS Integrado [Ton/mes]	22308.93	11593.70	2665.72	887.38	1182.35	4018.63

**Tabla A.6: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 8.5 en la cuenca “Río Loncomilla en Las Brisas”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	64.11	256.54	553.96	531.93	454.17	376.14
GSS Rutinario [Ton/día]	56.23	610.68	2295.31	2140.54	1631.08	1179.43
GSS Integrado [Ton/día]	140.58	1526.69	5738.28	5351.36	4077.69	2948.56
GSS Integrado [Ton/mes]	4217.25	47327.47	172148.41	165892.23	126408.51	88456.93

**Tabla A.6: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 8.5 en la cuenca “Río Loncomilla en Las Brisas”. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	195.85	110.27	53.72	35.25	36.49	49.74
GSS Rutinario [Ton/día]	383.87	142.92	41.48	20.10	21.33	36.35
GSS Integrado [Ton/día]	959.67	357.30	103.71	50.25	53.33	90.86
GSS Integrado [Ton/mes]	29749.90	10718.91	3214.91	1557.84	1493.22	2816.75

**Tabla A.7: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario actual en la cuenca “Río Itata en Coelemu”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	85.33	358.01	682.22	665.46	651.96	529.29
GSS Rutinario [Ton/día]	134.23	1204.66	3231.20	3110.51	3014.50	2191.22
GSS Integrado [Ton/día]	335.57	3011.66	8078.00	7776.27	7536.26	5478.04
GSS Integrado [Ton/mes]	10067.24	93361.51	242340.02	241064.31	233624.08	164341.22

**Tabla A.7: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario actual en la cuenca “Río Itata en Coelemu”. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	384.53	246.58	116.17	42.42	28.71	36.01
GSS Rutinario [Ton/día]	1343.87	680.89	215.22	46.07	25.35	35.85
GSS Integrado [Ton/día]	3359.68	1702.22	538.05	115.17	63.37	89.63
GSS Integrado [Ton/mes]	104150.22	51066.70	16679.50	3455.01	1774.41	2688.87

**Tabla A.8: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 2.6 en la cuenca “Río Itata en Coelemu”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	93.44	338.15	544.06	563.30	656.10	529.74
GSS Rutinario [Ton/día]	154.24	1103.94	2285.52	2410.30	3043.87	2194.09
GSS Integrado [Ton/día]	385.61	2759.85	5713.80	6025.75	7609.67	5485.22
GSS Integrado [Ton/mes]	11568.28	85555.38	171413.88	186798.12	235899.90	164556.67

**Tabla A.8: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 2.6 en la cuenca “Río Itata en Coelemu”. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	359.14	248.18	90.38	33.37	25.58	43.09
GSS Rutinario [Ton/día]	1210.47	687.63	146.59	31.91	21.24	47.18
GSS Integrado [Ton/día]	3026.17	1719.08	366.47	79.78	53.10	117.95
GSS Integrado [Ton/mes]	93811.32	51572.32	11360.49	2393.44	1486.76	3538.47

**Tabla A.9: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 8.5 en la cuenca “Río Itata en Coelemu”.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/seg]	77.62	347.72	652.24	651.57	633.44	550.14
GSS Rutinario [Ton/día]	116.13	1152.09	3016.50	3011.76	2884.44	2324.70
GSS Integrado [Ton/día]	290.33	2880.23	7541.25	7529.41	7211.11	5811.75
GSS Integrado [Ton/mes]	8709.82	89287.08	226237.62	233411.70	223544.43	174352.36

**Tabla A.9: Caudal, GSS Rutinario y GSS Integrado para el escenario RCP 8.5 en la cuenca “Río Itata en Coelemu”. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/seg]	371.80	227.29	101.11	44.22	29.26	36.21
GSS Rutinario [Ton/día]	1276.39	601.07	174.04	49.10	26.09	36.16
GSS Integrado [Ton/día]	3190.98	1502.66	435.11	122.74	65.23	90.40
GSS Integrado [Ton/mes]	98920.33	45079.94	13488.37	3682.32	1826.34	2712.05



## Anexo B: Capas utilizadas en el método RUSLE/SDR.

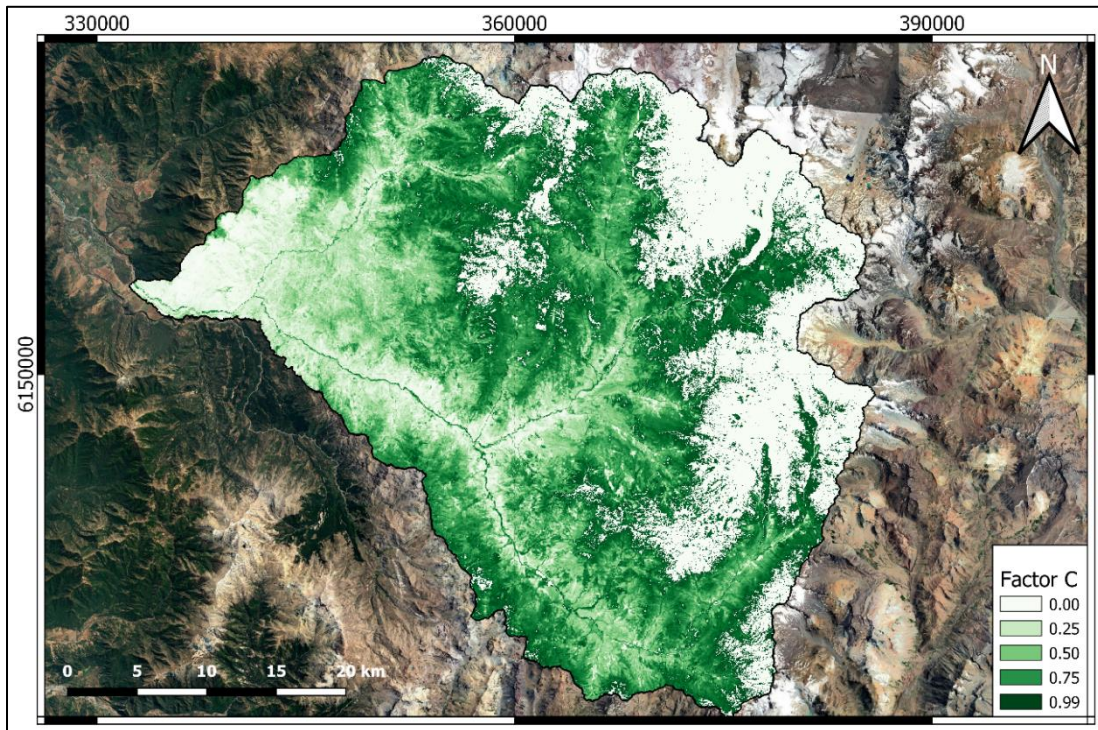


Figura B.1: Capa C para escenario actual asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

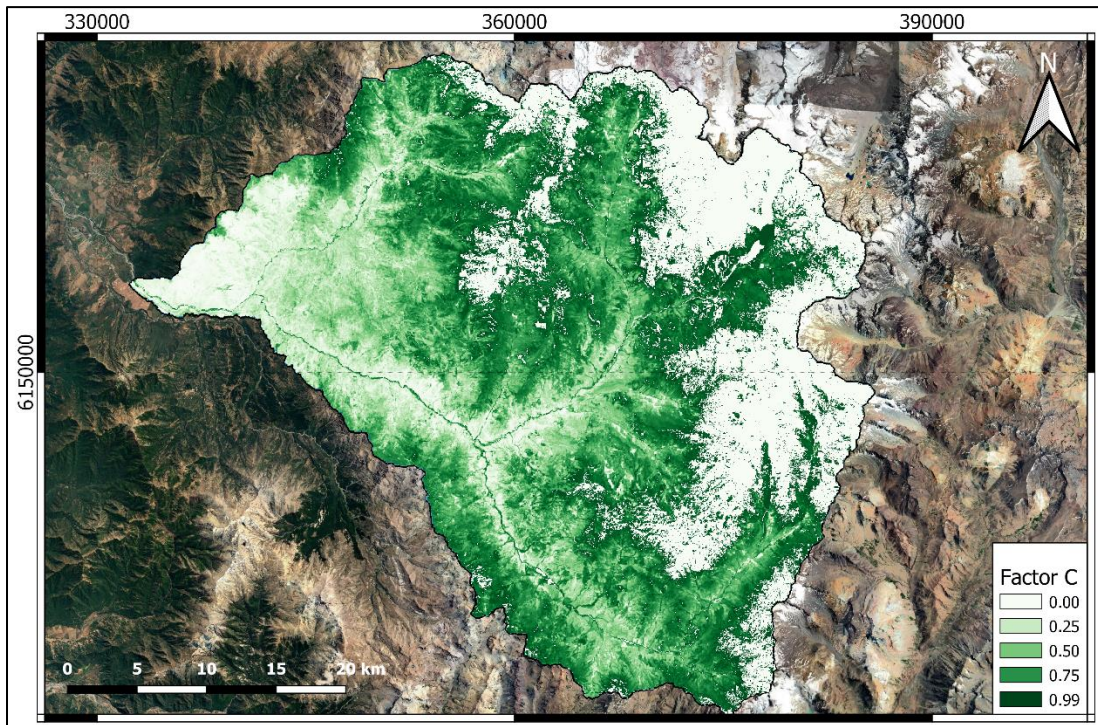


Figura B.2: Capa C para escenario RCP 2.6 asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

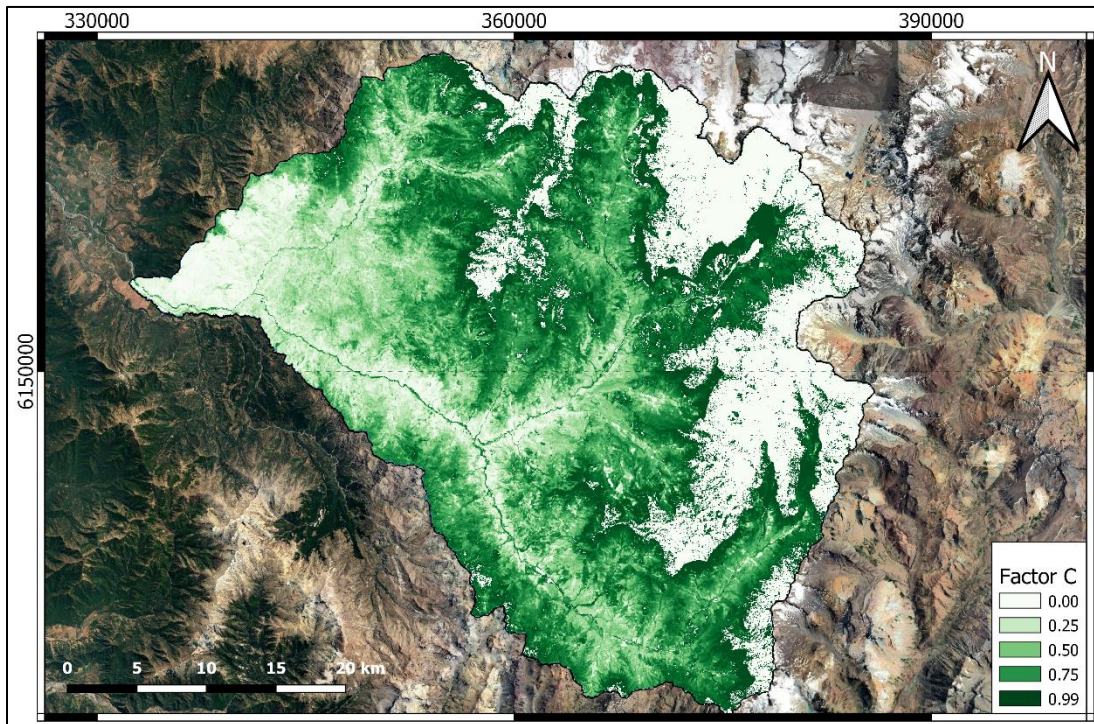


Figura B.3: Capa C para escenario RCP 8.5 asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

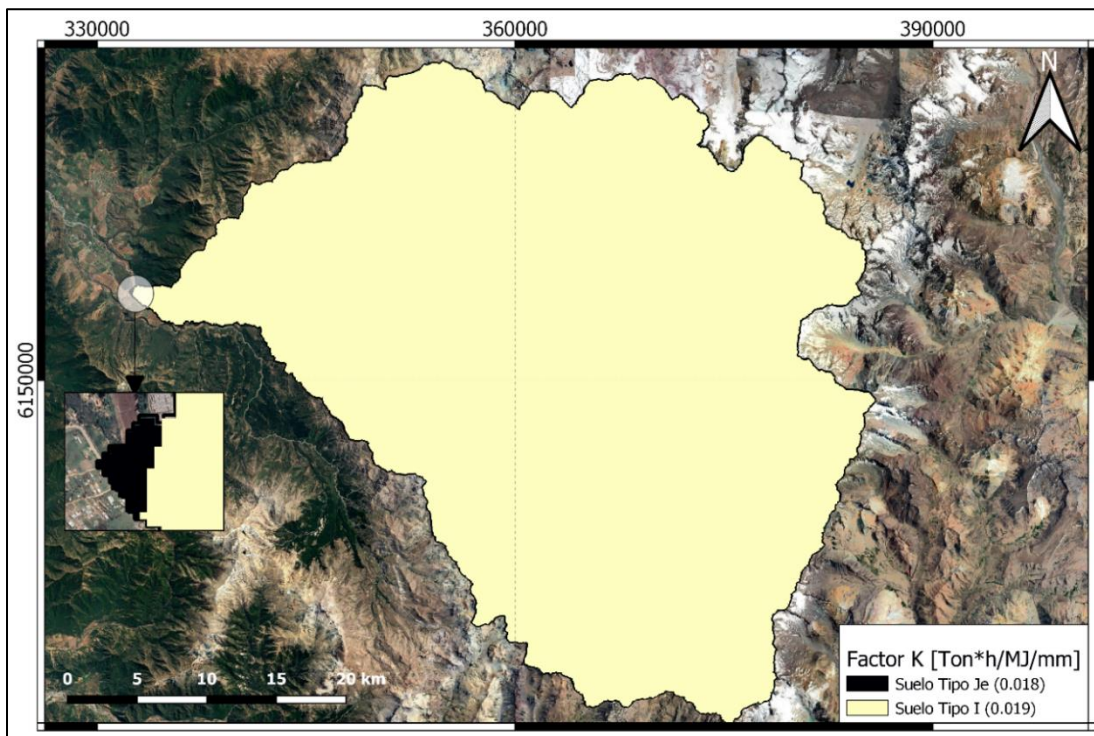
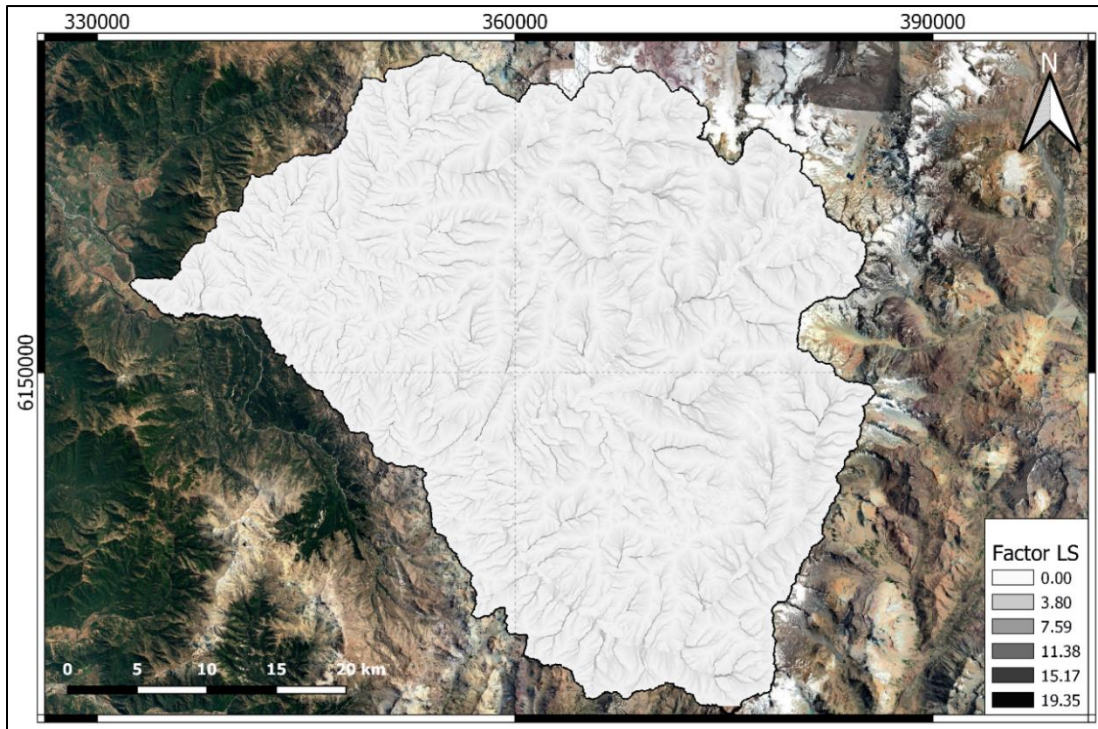


Figura B.4: Capa K asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

**Tabla B.1: Valores por Tipo de Suelo para el Factor K en Río Tinguiririca Bajo Los Briones.**

Tipo Suelo	OrgC [%]	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]	f <sub>csand</sub>	f <sub>clsi</sub>	f <sub>orgC</sub>	f <sub>hisand</sub>	Factor K
JE	1.150	70.800	12.800	16.500	0.200	0.780	0.887	0.942	0.018
I	0.970	58.900	16.200	24.900	0.200	0.756	0.927	0.994	0.019



**Figura B.5: Capa LS asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.**

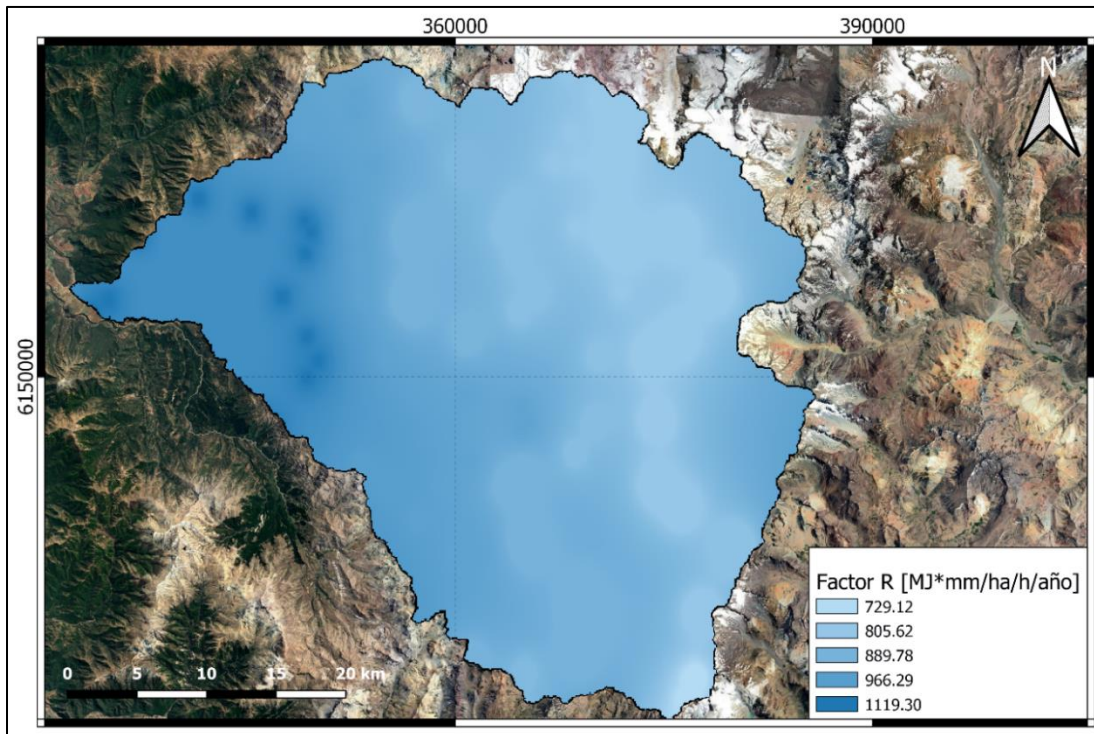


Figura B.6: Capa R en el escenario actual asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

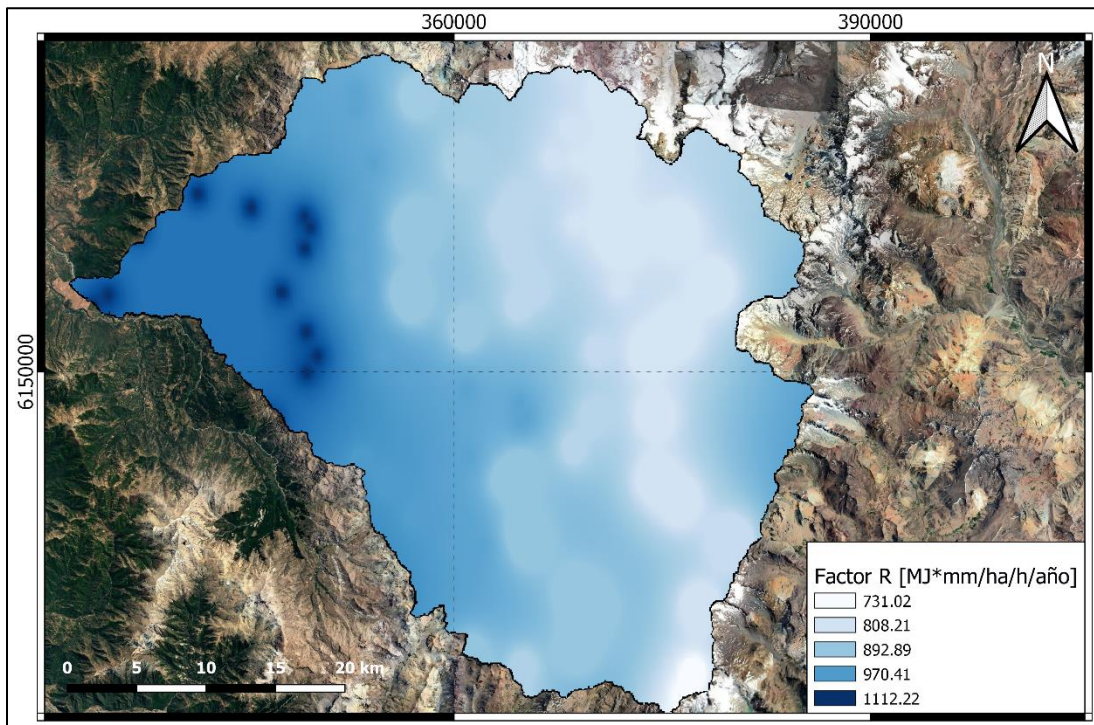


Figura B.7: Capa R en el escenario RCP 2.6 asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

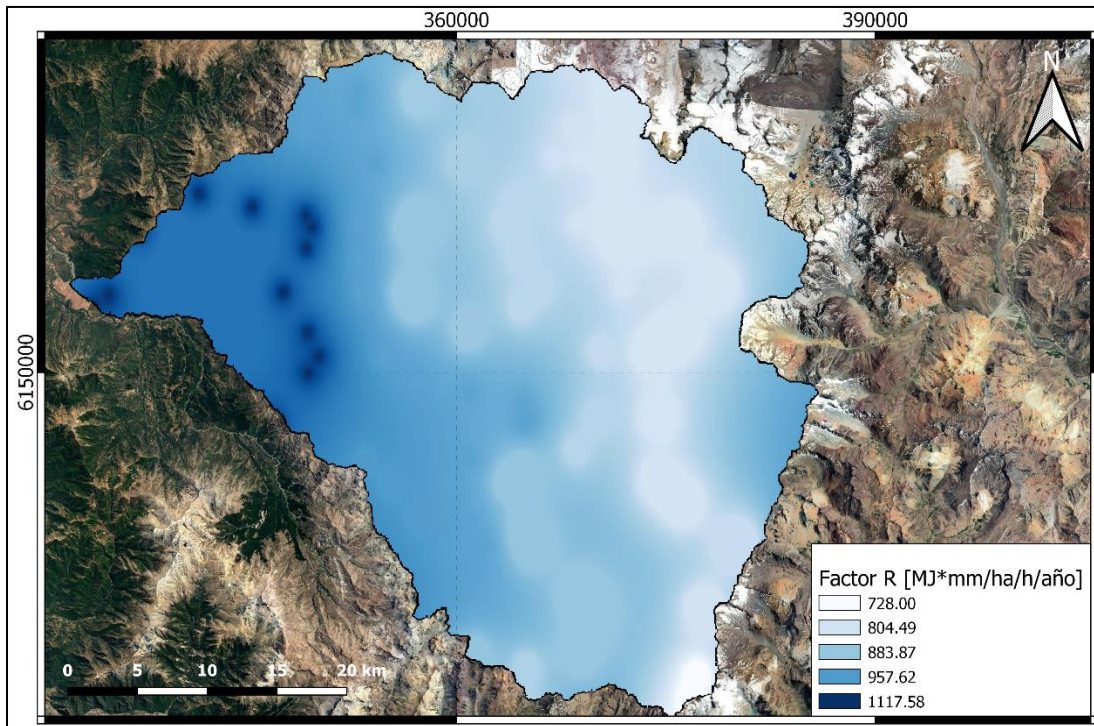


Figura B.8: Capa R en el escenario RCP 8.5 asociada a la cuenca Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

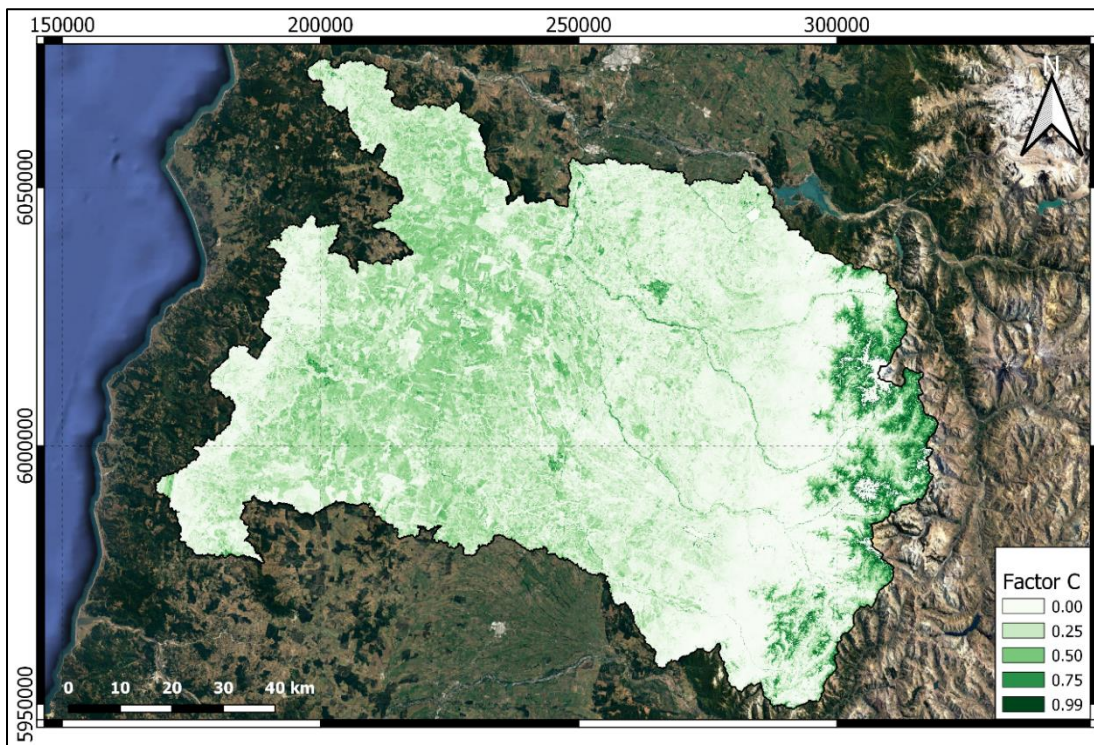


Figura B.9: Capa C en el escenario actual asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.

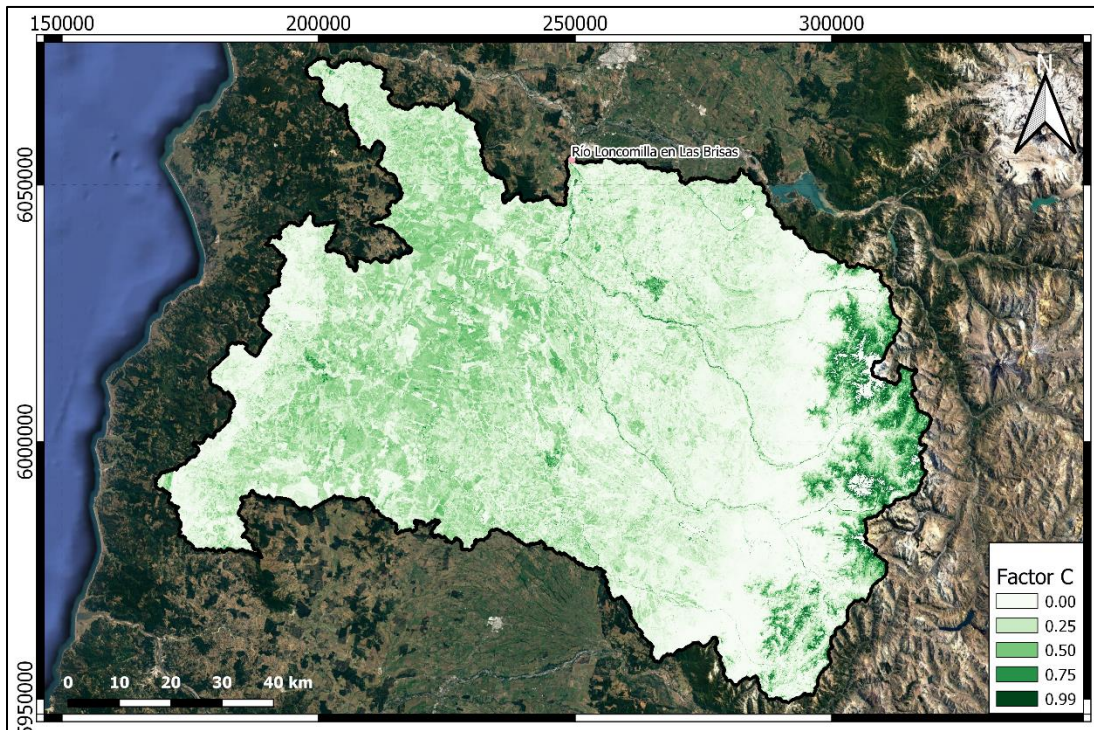


Figura B.10: Capa C en el escenario RCP 2.6 asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.

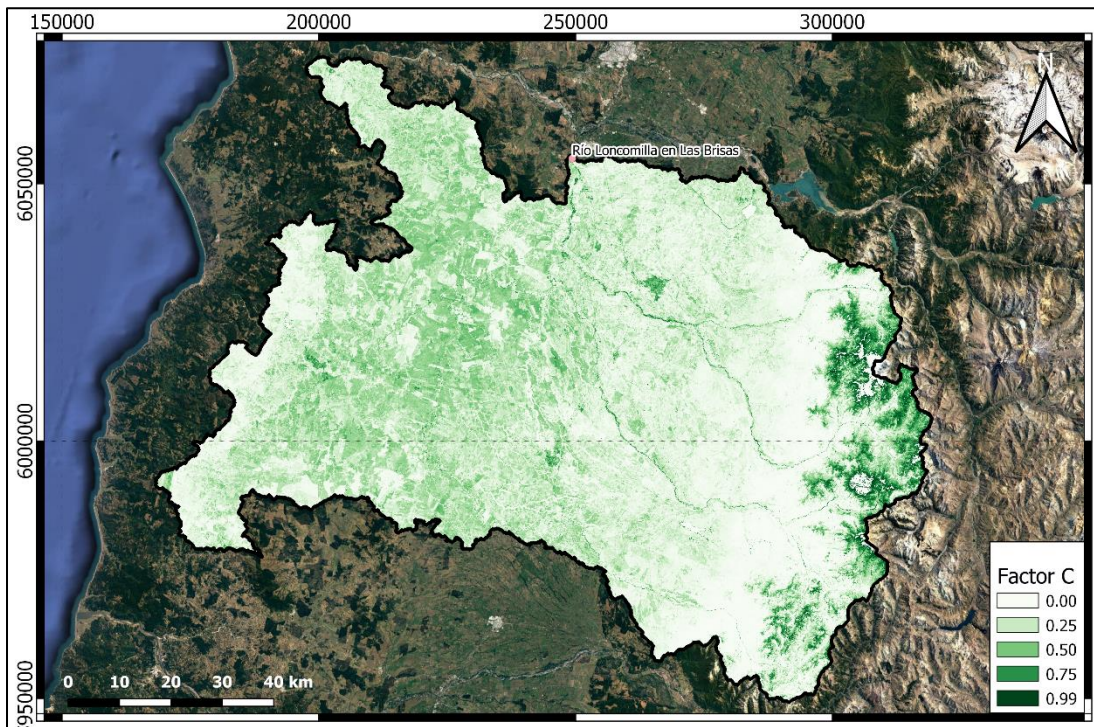
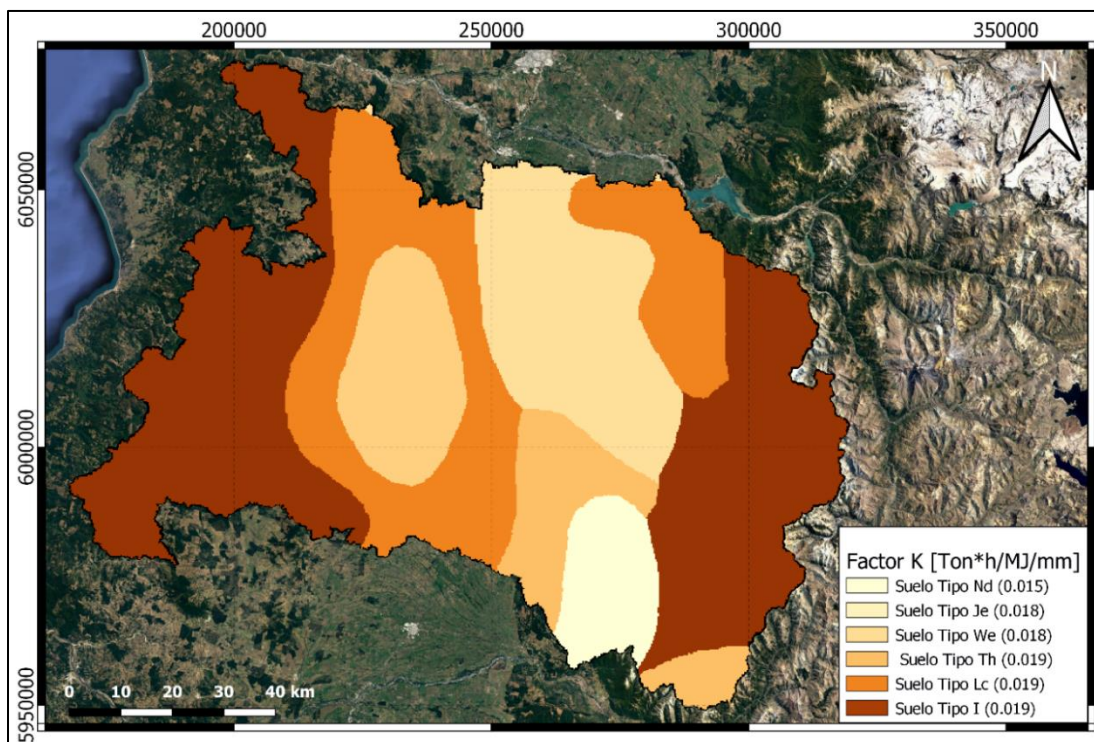


Figura B.11: Capa C en el escenario RCP 8.5 asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.



**Figura B.12: Capa K asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.**

**Tabla B.2: Valores por Tipo de Suelo para el Factor K en Río Loncomilla en Las Brisas.**

Tipo Suelo	OrgC [%]	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]	$f_{csand}$	$f_{clsi}$	$f_{orgC}$	$f_{hisand}$	Factor K
Nd	1.570	38.900	17.600	43.600	0.200	0.688	0.801	1.000	0.015
Je	1.150	70.800	12.800	16.500	0.200	0.780	0.887	0.942	0.018
We	0.460	76.600	10.300	13.100	0.200	0.782	0.990	0.850	0.018
Th	7.030	41.000	41.300	17.700	0.201	0.899	0.750	1.000	0.019
Lc	0.630	64.300	12.200	23.500	0.200	0.725	0.978	0.983	0.019
I	0.970	58.900	16.200	24.900	0.200	0.756	0.927	0.994	0.019

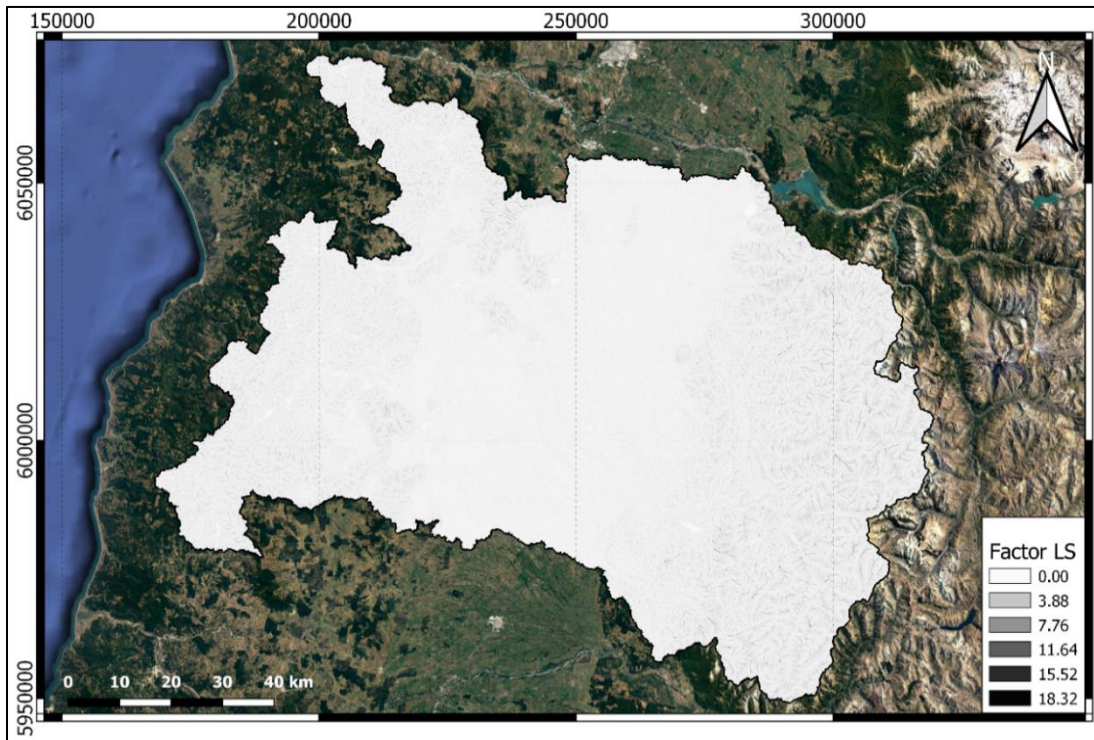


Figura B.13: Capa LS asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.

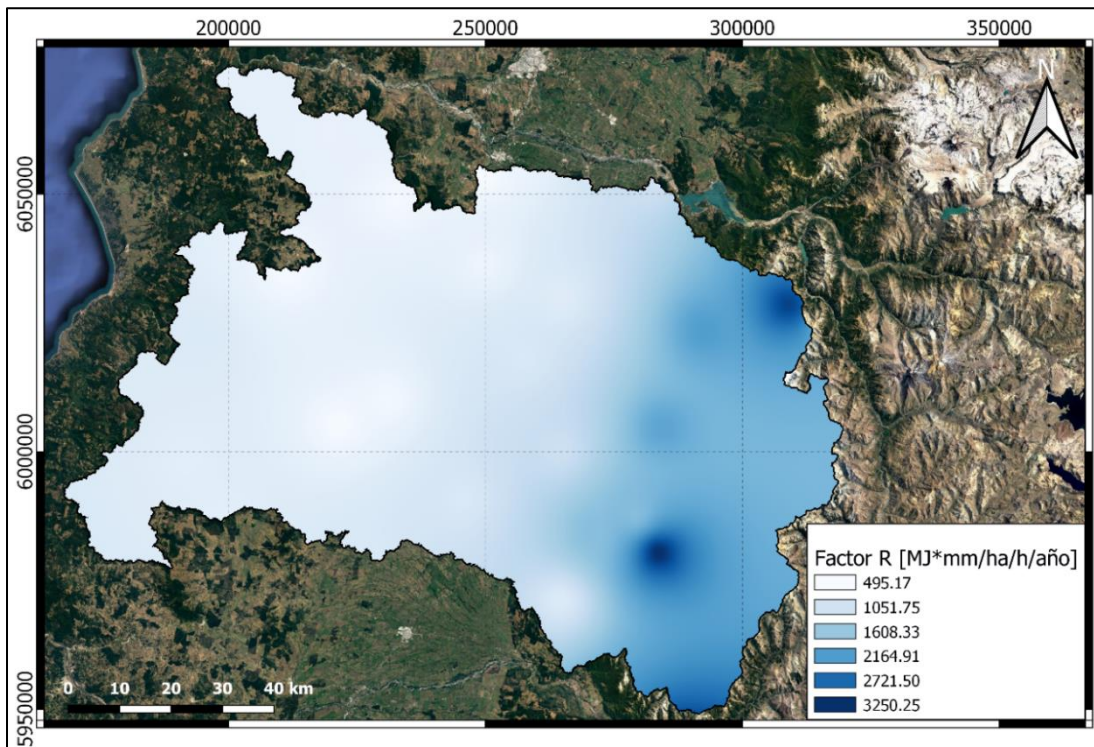


Figura B.14: Capa R en el escenario actual asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.



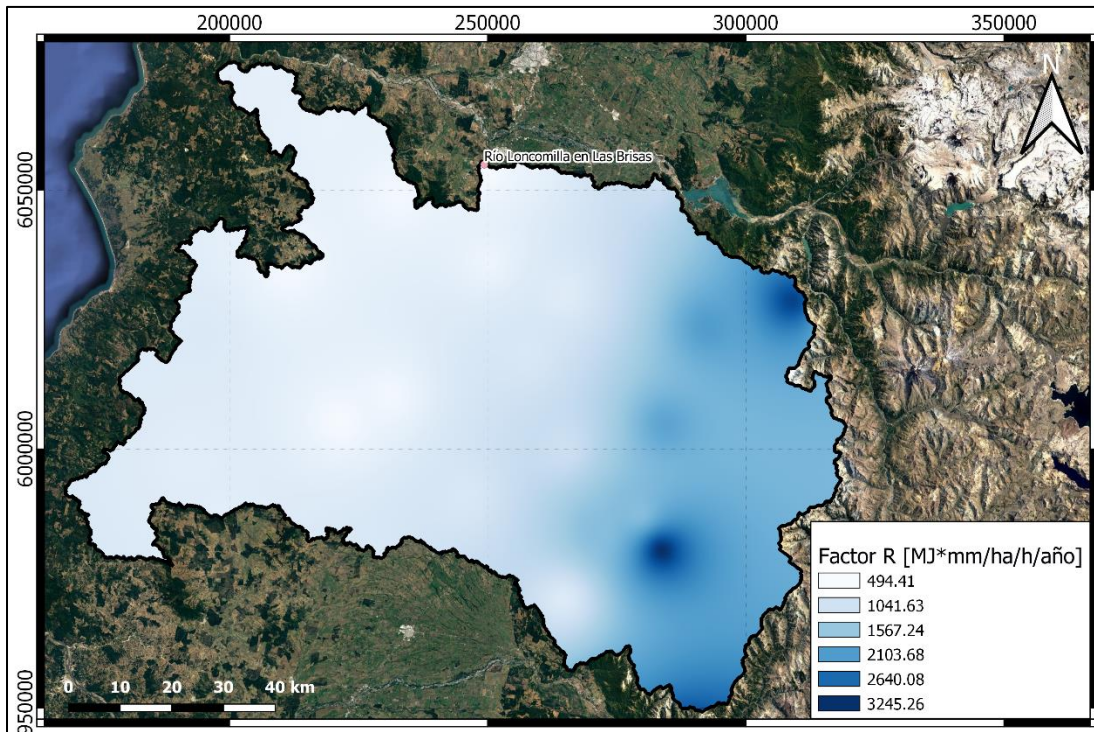


Figura B.15: Capa R en el escenario RCP 2.6 asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.

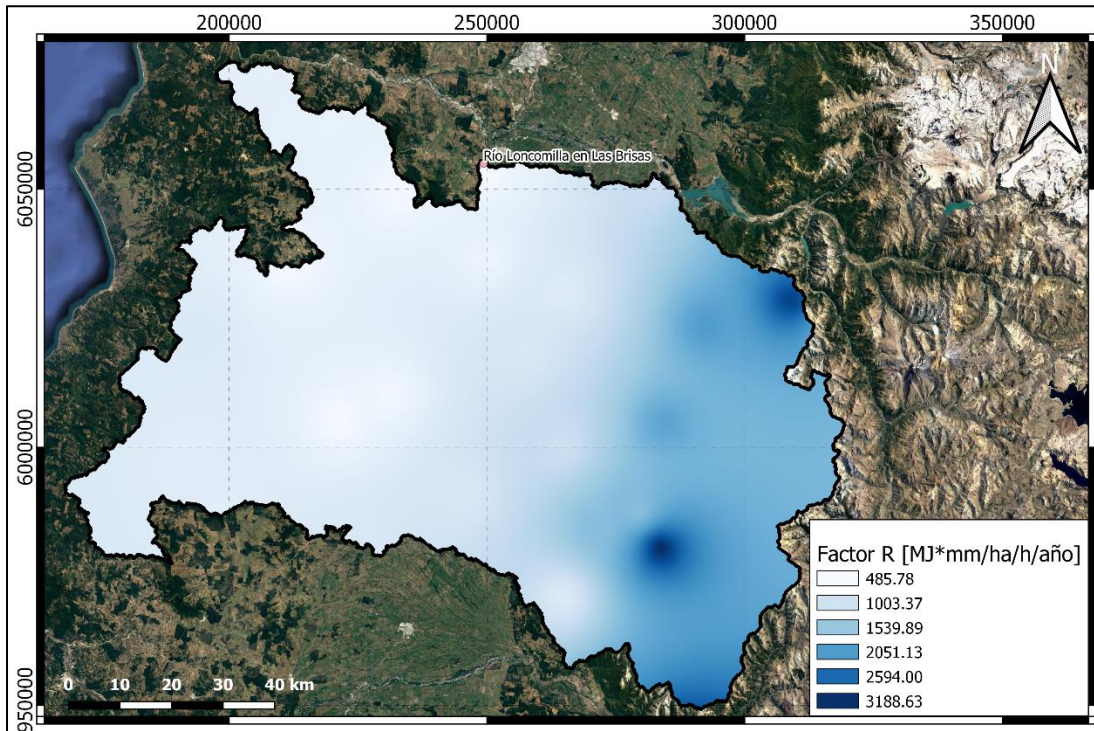
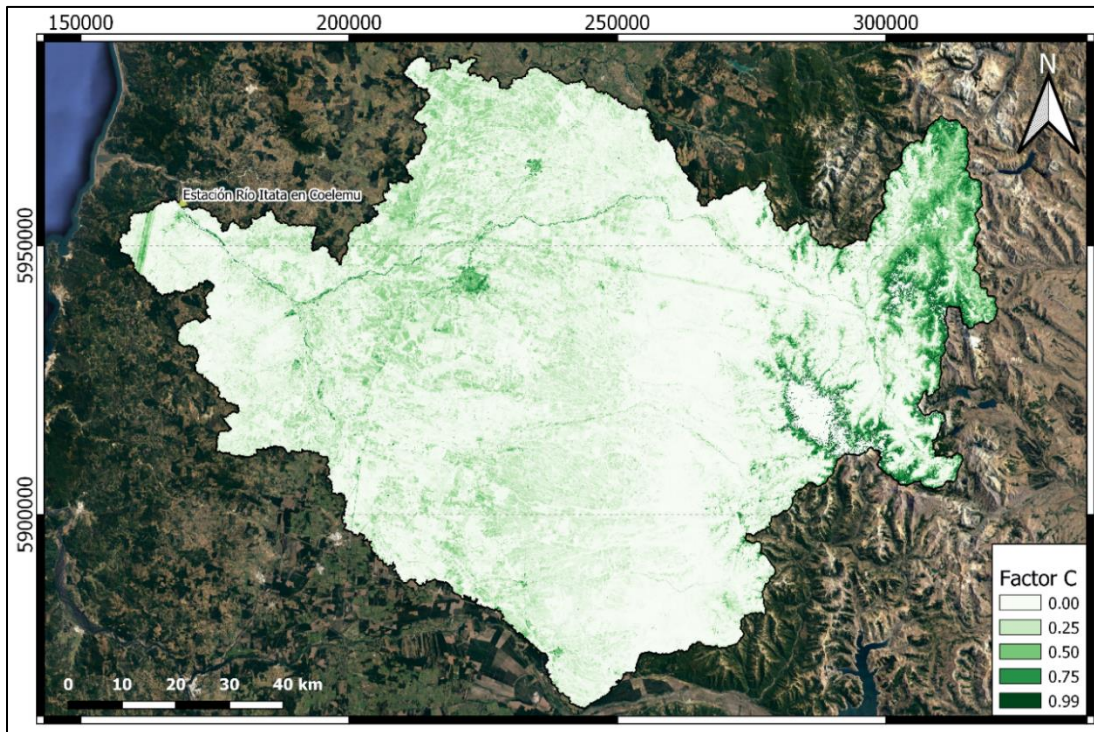
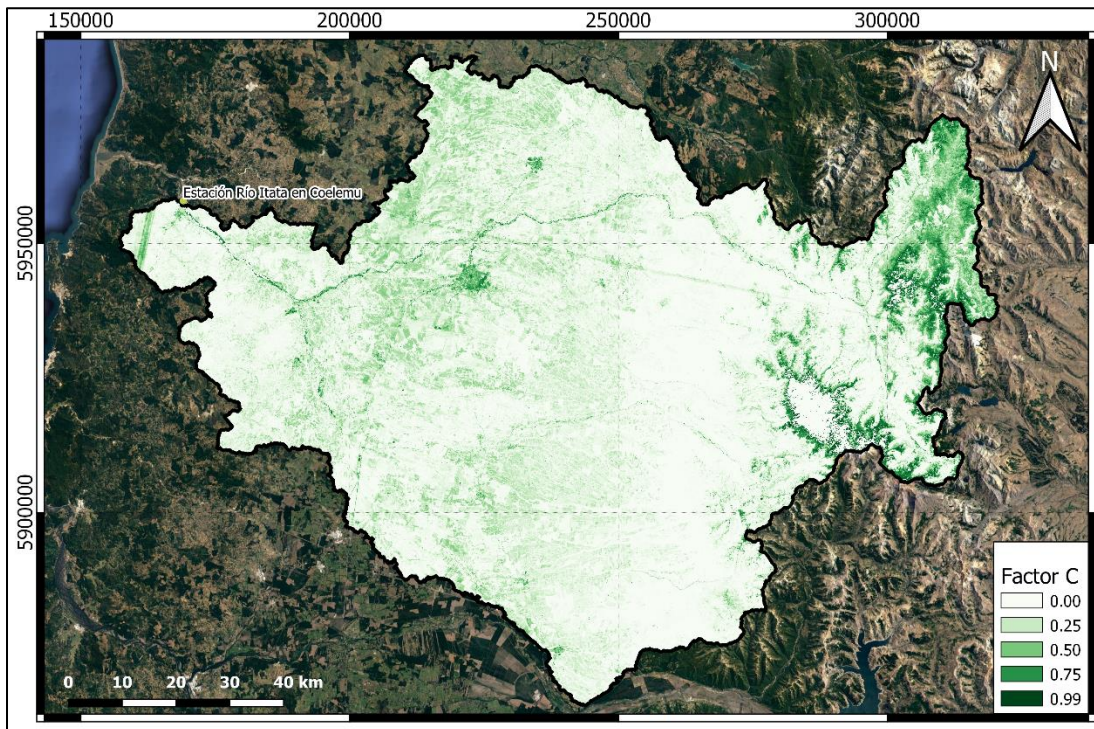


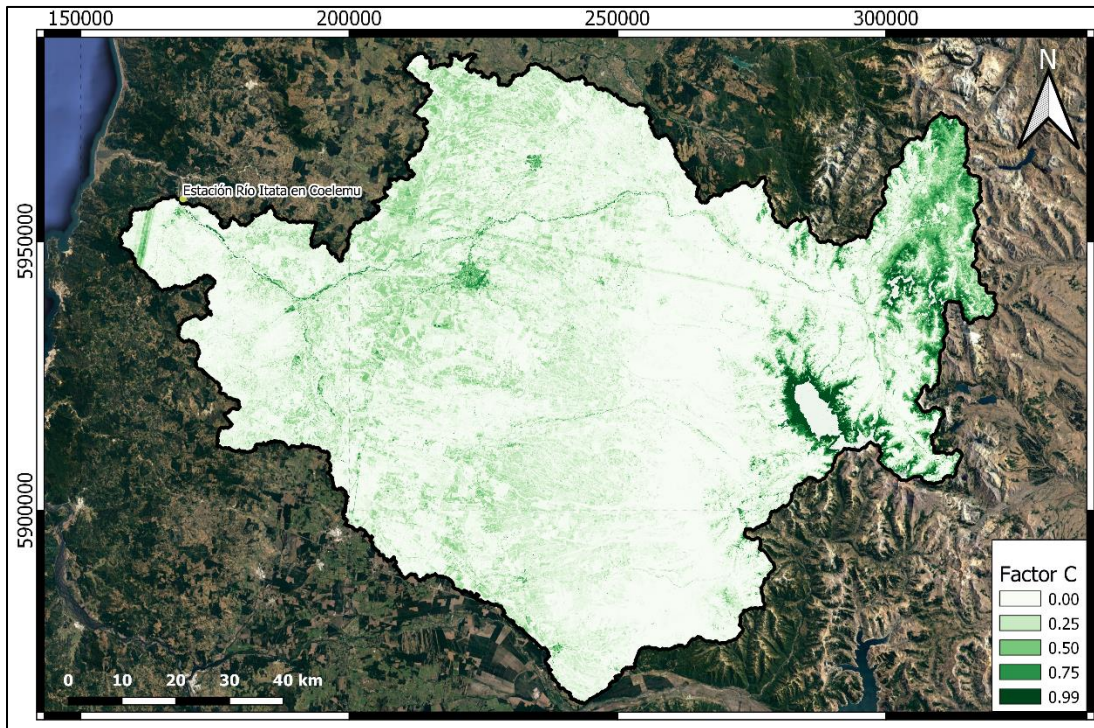
Figura B.16: Capa R en el escenario RCP 8.5 asociada a la cuenca Río Loncomilla en Las Brisas.



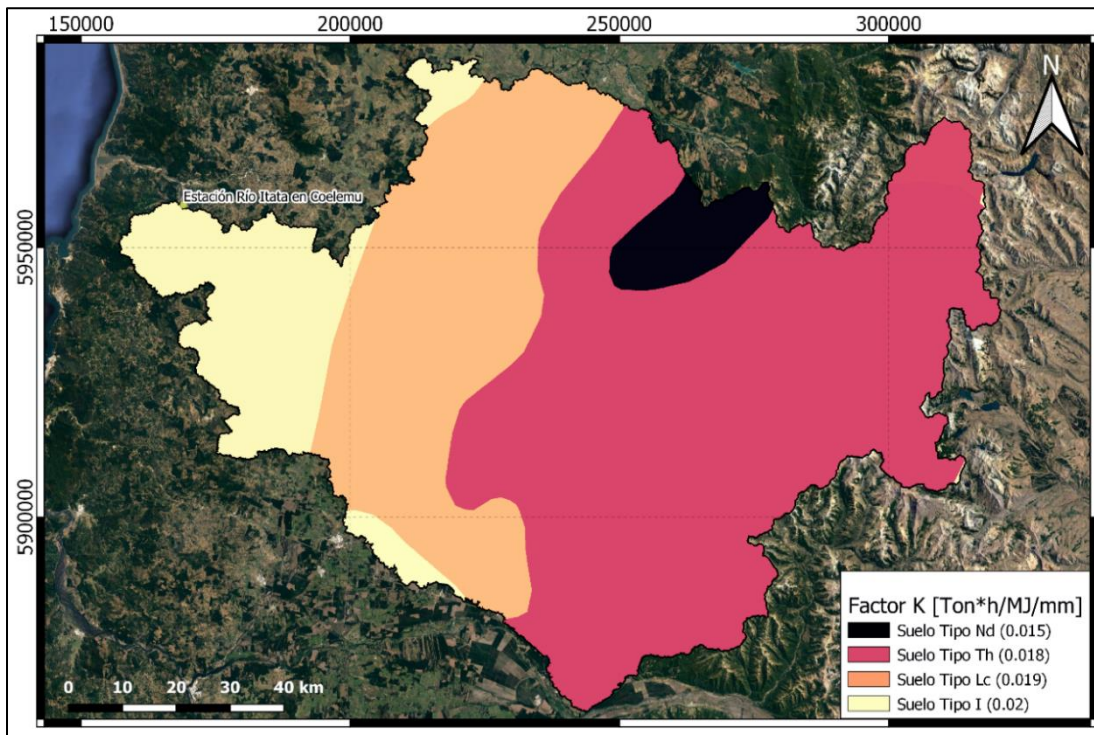
**Figura B.17: Capa C en el escenario actual asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**



**Figura B.18: Capa C en el escenario RCP 2.6 asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**



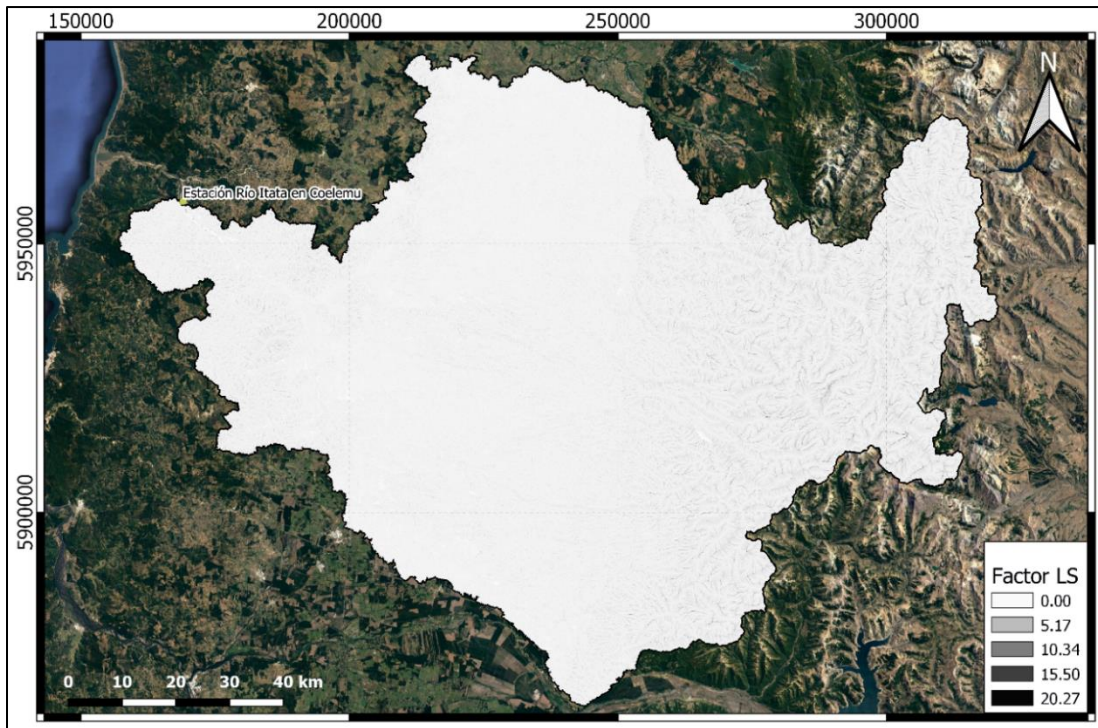
**Figura B.19: Capa C en el escenario RCP 8.5 asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**



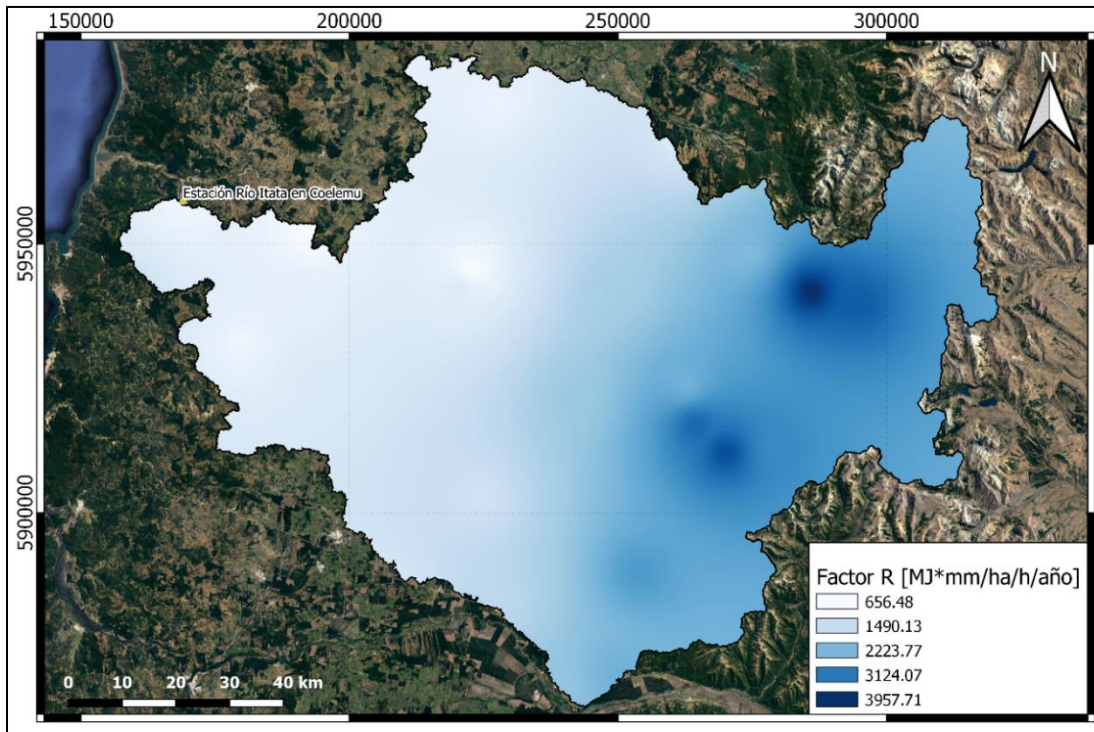
**Figura B.20: Capa K asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**

**Tabla B.3: Valores por Tipo de Suelo para el Factor K en Río Itata en Coelemu.**

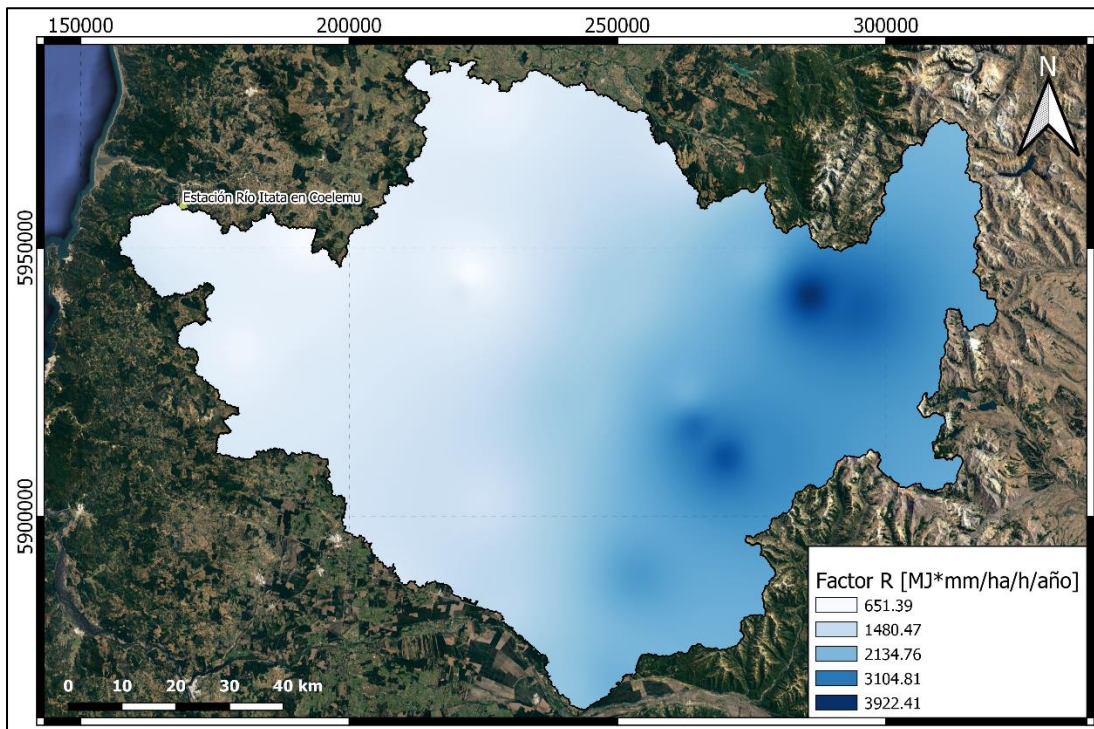
Tipo Suelo	OrgC [%]	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]	$f_{csand}$	$f_{clsi}$	$f_{orgC}$	$f_{hisand}$	Factor K
Nd	1.570	38.900	17.600	43.600	0.200	0.688	0.801	1.000	0.015
Th	7.030	41.000	41.300	17.700	0.201	0.899	0.750	1.000	0.018
Lc	0.630	64.300	12.200	23.500	0.200	0.725	0.978	0.983	0.019
I	0.970	58.900	16.200	24.900	0.200	0.756	0.927	0.994	0.019



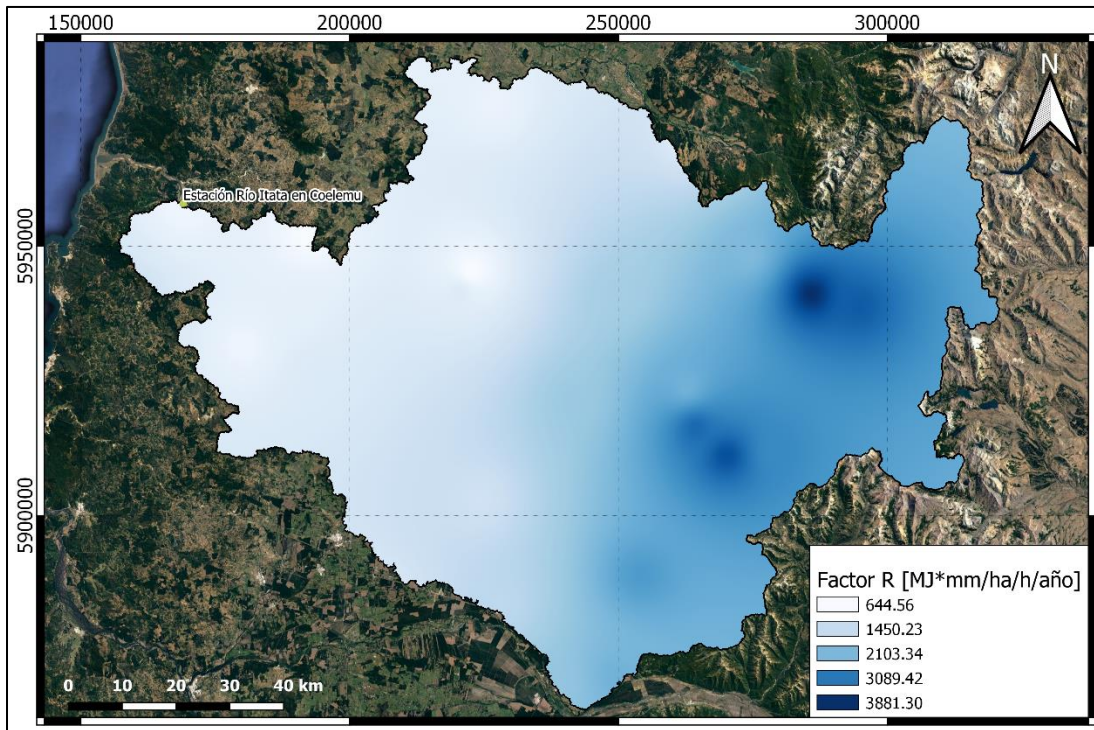
**Figura B.21: Capa LS asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**



**Figura B.22: Capa R en el escenario actual asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**



**Figura B.23: Capa R en el escenario RCP 2.6 asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**



**Figura B.24: Capa R en el escenario RCP 8.5 asociada a la cuenca Río Itata en Coelemu.**

**Anexo C: Fotografías utilizadas en la obtención de la Curva Granulométrica.**



**Figura C.1: Imagen I río Loncomilla.**



**Figura C.2: Imagen II río Loncomilla.**



**Figura C.3: Imagen III río Loncomilla.**



**Figura C.4: Imagen IV río Loncomilla.**



## Anexo D: Datos Utilizados para obtener el Gasto Sólido de Fondo.

### Río Tinguiririca Bajo Los Briones

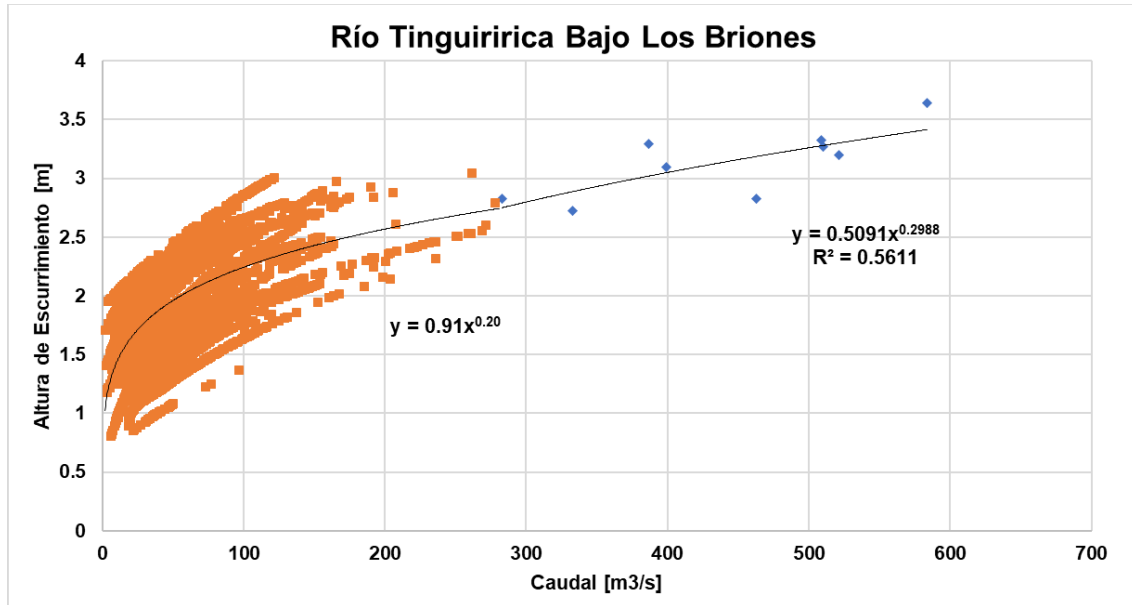


Figura D.1: Altura de Escorrimento según el Caudal en Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

Tabla D.1: Caudales y Alturas asociadas para Río Tinguiririca Bajo Los Briones.

		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/s]	Línea Base	29.08	37.30	29.40	32.00	30.10	36.60
	RCP 2.6	31.60	37.38	24.82	29.35	30.21	34.39
	RCP 8.5	26.59	36.16	29.37	31.09	28.34	34.60
Altura [m]	Línea Base	1.76	1.85	1.77	1.80	1.78	1.84
	RCP 2.6	1.79	1.85	1.71	1.77	1.78	1.82
	RCP 8.5	1.73	1.84	1.77	1.79	1.75	1.82

Tabla D.1: Caudales y Alturas asociadas para Río Tinguiririca Bajo Los Briones. (Continuación)

		Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m3/s]	Línea Base	55.40	75.20	117.00	113.00	71.00	38.60
	RCP 2.6	55.81	65.72	86.16	103.04	69.68	46.08
	RCP 8.5	49.85	64.45	103.11	112.33	72.99	38.94
Altura [m]	Línea Base	2.00	2.12	2.31	2.30	2.10	1.86
	RCP 2.6	2.00	2.07	2.18	2.26	2.09	1.93
	RCP 8.5	1.96	2.06	2.26	2.30	2.11	1.87

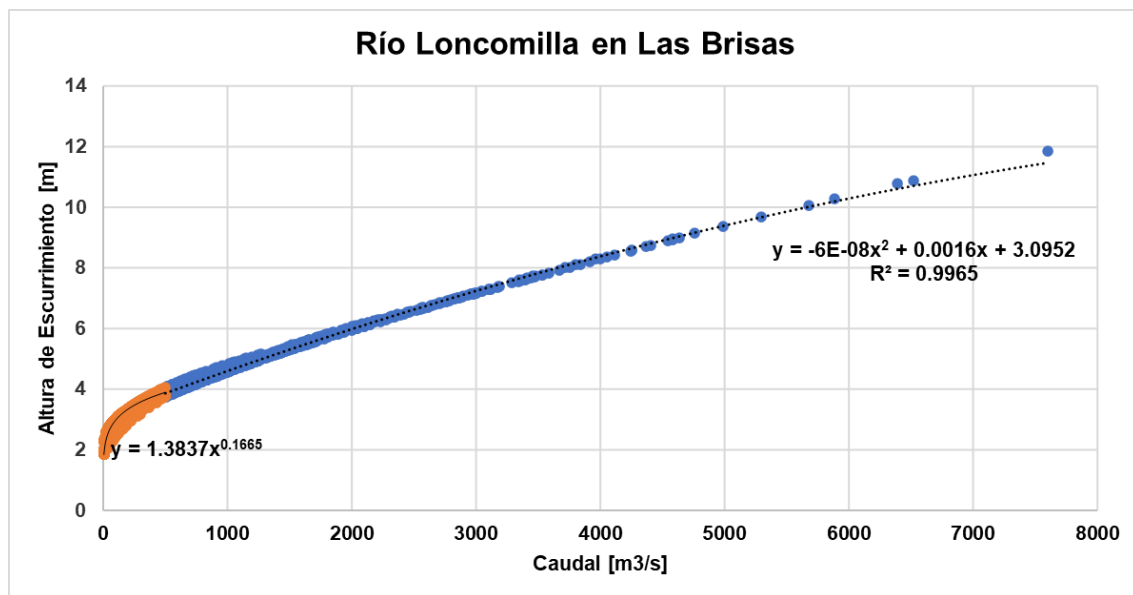
**Tabla D.2: Diferencial Porcentual del escenario RCP 2.6 y 8.5 de Wilcock & Crowe para Río Tinguiririca Bajo Los Briones.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
RCP 2.6	4.66	1.75	-4.03	-1.27	1.84	-0.47
RCP 8.5	-1.35	0.60	1.68	0.70	-0.37	-0.26

**Tabla D.2: Diferencial Porcentual del escenario RCP 2.6 y 8.5 de Wilcock & Crowe para Río Tinguiririca Bajo Los Briones. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
RCP 2.6	1.86	-2.97	-8.45	-1.61	0.92	8.00
RCP 8.5	-1.98	-3.61	-2.74	1.28	2.52	1.98

### Río Loncomilla en Las Brisas.



**Figura D.2: Altura de Escurrimiento según el Caudal en Río Loncomilla en Las Brisas.**

**Tabla D.3: Caudales y Alturas asociadas para Río Loncomilla en Las Brisas.**

		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m3/s]	Línea Base	29.08	37.30	29.40	32.00	30.10	36.60
	RCP 2.6	31.60	37.38	24.82	29.35	30.21	34.39
	RCP 8.5	26.59	36.16	29.37	31.09	28.34	34.60
Altura [m]	Línea Base	1.76	1.85	1.77	1.80	1.78	1.84
	RCP 2.6	1.79	1.85	1.71	1.77	1.78	1.82
	RCP 8.5	1.73	1.84	1.77	1.79	1.75	1.82

**Tabla D.3: Caudales y Alturas asociadas para Río Loncomilla en Las Brisas. (Continuación)**

		Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Línea Base	55.40	75.20	117.00	113.00	71.00	38.60
	RCP 2.6	55.81	65.72	86.16	103.04	69.68	46.08
	RCP 8.5	49.85	64.45	103.11	112.33	72.99	38.94
Altura [m]	Línea Base	2.00	2.12	2.31	2.30	2.10	1.86
	RCP 2.6	2.00	2.07	2.18	2.26	2.09	1.93
	RCP 8.5	1.96	2.06	2.26	2.30	2.11	1.87

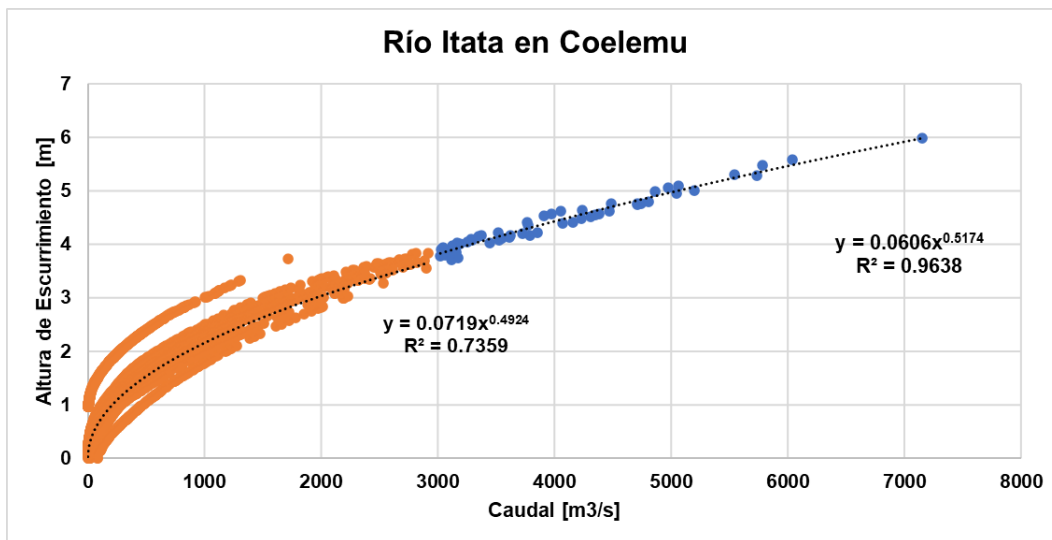
**Tabla D.4: Diferencial Porcentual del escenario RCP 2.6 y 8.5 de Wilcock & Crowe para Río Loncomilla en Las Brisas.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
RCP 2.6	4.66	1.75	-4.03	-1.27	1.84	-0.47
RCP 8.5	-1.35	0.60	1.68	0.70	-0.37	-0.26

**Tabla D.4: Diferencial Porcentual del escenario RCP 2.6 y 8.5 de Wilcock & Crowe para Río Loncomilla en Las Brisas. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
RCP 2.6	1.86	-2.97	-8.45	-1.61	0.92	8.00
RCP 8.5	-1.98	-3.61	-2.74	1.28	2.52	1.98

### Río Itata en Coelemu.



**Figura D.3: Altura de Escurrimiento según el Caudal en Río Itata en Coelemu.**

**Tabla D.5: Caudales y Alturas asociadas para Río Itata en Coelemu.**

		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Línea Base	29.08	37.30	29.40	32.00	30.10	36.60
	RCP 2.6	31.60	37.38	24.82	29.35	30.21	34.39
	RCP 8.5	26.59	36.16	29.37	31.09	28.34	34.60
Altura [m]	Línea Base	1.76	1.85	1.77	1.80	1.78	1.84
	RCP 2.6	1.79	1.85	1.71	1.77	1.78	1.82
	RCP 8.5	1.73	1.84	1.77	1.79	1.75	1.82

**Tabla D.5: Caudales y Alturas asociadas para Río Itata en Coelemu. (Continuación)**

		Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Línea Base	55.40	75.20	117.00	113.00	71.00	38.60
	RCP 2.6	55.81	65.72	86.16	103.04	69.68	46.08
	RCP 8.5	49.85	64.45	103.11	112.33	72.99	38.94
Altura [m]	Línea Base	2.00	2.12	2.31	2.30	2.10	1.86
	RCP 2.6	2.00	2.07	2.18	2.26	2.09	1.93
	RCP 8.5	1.96	2.06	2.26	2.30	2.11	1.87

**Tabla D.6: Diferencial Porcentual del escenario RCP 2.6 y 8.5 de Wilcock & Crowe para Río Itata en Coelemu.**

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
RCP 2.6	4.66	1.75	-4.03	-1.27	1.84	-0.47
RCP 8.5	-1.35	0.60	1.68	0.70	-0.37	-0.26

**Tabla D.6: Diferencial Porcentual del escenario RCP 2.6 y 8.5 de Wilcock & Crowe para Río Itata en Coelemu. (Continuación)**

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
RCP 2.6	1.86	-2.97	-8.45	-1.61	0.92	8.00
RCP 8.5	-1.98	-3.61	-2.74	1.28	2.52	1.98