



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

**IMPACTO DE INCENDIOS FORESTALES EN EL GASTO SÓLIDO DE CAUCES
NATURALES. INCENDIO DE 2017 EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL

ALEJANDRO IGNACIO PIZARRO BADILLA

PROFESOR GUÍA:

YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LUIS ZAMORANO RIQUELME

ENRIQUE GALECIO VALDÉS

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: ALEJANDRO PIZARRO BADILLA
FECHA: 22/05/2021
PROF. GUÍA: YARKO NIÑO**

**IMPACTO DE INCENDIOS FORESTALES EN EL GASTO SÓLIDO DE CAUCES
NATURALES. INCENDIO DE 2017 EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE, CHILE.**

La ocurrencia de incendios forestales es sin duda un agente de cambio significativo en los ecosistemas existentes alrededor del mundo. La magnitud y frecuencia con que ocurren en una determinada zona alteran de manera importante diferentes aspectos, dentro de ellos, aquellos que tienen relación con los procesos hidrológicos en las cuencas afectadas.

Este estudio tiene como contexto el gran incendio forestal del año 2017 en la zona centro- sur de Chile, teniendo como lugar de interés específico, la cuenca del río Maule, unidad hidrológica que abarca casi la totalidad de la región del mismo nombre. El objetivo principal es estimar las variaciones de gasto sólido total asociado a la acción del incendio sobre la cuenca mencionada, dicha estimación resulta importante para comprender posibles escenarios futuros relacionados a los procesos de transporte de sólidos, teniendo áreas de interés científico importantes como lo son la desembocadura del río Maule en el océano Pacífico donde se ubica la ciudad de Constitución.

El estudio se desarrolla principalmente bajo el manejo de capas satelitales que, mediante modificaciones basadas en literatura pertinente y la aplicación metodologías empíricas, permite obtener estimaciones de suelo erosionado que potencialmente forma parte del gasto sólido suspendido, dicha erosión se genera debido a la drástica disminución de cobertura vegetal que proteja al suelo del efecto erosivo de agentes como por ejemplo la lluvia. Se contempla además cambios en la capacidad de infiltración del suelo quemado, el cual adquiere comportamientos hidrofóbicos, según antecedentes recopilados de observaciones y estudios en cuencas afectadas por incendios forestales en EEUU.

Las áreas en que se aplicación las modificaciones mencionadas son individualizadas gracias al registro del dNBR, índice que representa la severidad de incendio calculado en base a contrastar la cobertura vegetal en imágenes satelitales anteriores y posteriores al evento en estudio. La metodología empírica utilizada para la obtención de gasto sólido suspendido es el modelo conjunto RUSLE/SDR, la aplicación de dicho modelo indica que, en comparación a las condiciones anteriores del incendio en la cuenca, el transporte de sedimento en suspensión aumenta aproximadamente en un 167% respecto a su valor promedio anual en el periodo entre 1986 - 2016.

Las variaciones en la capacidad de infiltración de suelo, emulando comportamiento hidrofóbico del mismo producto del incendio, se generan en base a la modificación de los valores de Curva Número asociados. Se obtienen porcentajes de variación de gasto sólido fondo calculado según diversos autores, para tres caudales con distinto periodo de retorno. Las variaciones arrojan un aumento que va entre el 1.5% y el 8.1% respecto a un escenario base.

*“A la flor blanca que crece en cada uno de nosotros, la cual alimentamos con amor y
humanidad.”*

Agradecimientos

He decido dejar los agradecimientos como última sección a escribir en mi memoria, porque son cada vez más quienes merecen un agradecimiento de mí, por ser parte de este camino de continuo aprendizaje y entrega que hoy da un gran paso hacia nuevos desafíos.

Gracias a las y los docentes que han sido parte de mi vida escolar y universitaria, cada minuto de sus enseñanzas han construido este camino que se completa con la defensa de mi título, pero que nunca culminará, porque si algo he aprendido gracias a ellos es a tener siempre el impulso de conocer más. Gracias a mis amigos del Liceo, cabros que estimo demasiado; Pato, Cristóbal, Pepe, Tito, Hans, Pollo, Chávez, Seba, Alejandro, Alexander, Iván y muchos más. A los que siempre han estado y espero siempre sigan estando para vivir nuevas experiencias, con quienes compartimos lo que teníamos, aunque fuera poco, porque sabíamos que apoyarnos era fundamental, desde lo más pequeño; José Miguel y Manuel. A mis amigos de Civil y de la U; Tomi, Nico, Noni, Pauli, Leo, Pipin, Kako, Mati, Chris, Dani, Diego, al gran Richard (una persona con calidad humana enorme), a Pudú, a Dilan, Ariel, David, Maxi (los cabros que conocí insolándome en la práctica de topo y que estimo muchísimo), a todo ellos, con quienes compartí penas y alegrías, carretes y estudios, a ustedes les doy infinitas gracias y espero sepan que cuentan conmigo ahora y siempre.

Quiero dar las gracias a personas especiales que han estado en mi vida, a Belén por mostrarme un lado de la vida que no conocía bien, por darme la confianza y la seguridad durante muchos años, por brindarme los tiempos para querer y ser querido, estoy seguro de que la vida te tendrá muchas alegrías por tu eterna bondad y calidez, a ti y tu familia les deseo siempre lo mejor. A mis tíos, tías, primos y primas, por estar en cada momento y tenderme siempre una mano de ayuda y fraternidad, saben que los quiero desde el fondo de mi alma.

Finalmente, termino estas palabras (que nunca serán suficientes para expresar el amor y cariño que les tengo a quienes menciono y muchos más) refiriéndome a mis tatas y padres. A mis tatas; les doy las gracias por haber estado presente desde los primeros recuerdos que tengo, abundantes de cariño, atención y humanidad, por sus comidas, por su cobijo, por su eterna ternura. Gracias papá, por cada día apoyar mis decisiones y darme ese empuje tan necesario para lograr mis objetivos, gracias a mi querida hermana, con quien me emociono cada vez que recuerdo los momentos de niños que hemos vivido, espero ser siempre una persona en quien puedas confiar, porque siempre estaré para ti, dándote consejos, abrazándote o tan solo estando a tu lado, a mi querida madre a quien no se como explicar cuanto la quiero cada día, si en algún momento lees estos párrafos (porque sé que lo harás), sabrás que quedé corto, me esforcare porque hasta el último de los días sepas que te estoy agradecido por la crianza que me has dado, por la vocación que has tenido y porque desde el primer minuto en que me tuviste a mí y a mi hermana, te avocaste a darnos los sentimientos más importantes que una madre puede transmitir a sus hijos, humanidad, empatía y amor.

Abuela (Mimama), ya han pasado algunos años desde que te marchaste de este mundo, no dudo que estas en un lugar privilegiado, porque siempre estuvo reservado para personas como tú. Lamento que no estes aquí riéndote de mis estupideces y bromas, he cuidado a mi madre y hermana como te prometí desde el último día que visitaste la casa. Si bien es extremadamente difícil escribir esto, sé que tu entiendes y sabes que nunca te dejaré de querer, espero volver a verte para contarte como, según tú, he salvado al mundo buscando agua por todos lados.

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 documento	2
Capítulo 2: Revisión Bibliográfica	4
2.1 Incendios Forestales	4
2.2 Severidad de Incendio	5
2.2 Transporte Hidráulico de Sólidos	7
2.2.1 Gasto Sólido.....	8
Capítulo 3: Zona de Estudio.....	11
3.1 Descripción zona de estudio	11
3.2 Información hidrometeorológica y sedimentométricas disponible.....	13
3.2.1 Información estaciones de monitoreo.....	13
3.2.2 Información Sedimentométrica en la zona de estudio.....	15
Capítulo 4: Metodología de trabajo	17
4.1 Método conjunto RUSLE/SDR	17
4.1.1 Información Satelital y Cálculo de Factores.....	20
4.1.2 Generación de escenarios pre y post incendio.....	27
4.2 Determinación de variaciones en escorrentía.....	28
4.2.1 Clasificación según tipo de suelo	30
4.2.2 Clasificación según uso de Suelo	31
4.3 Metodología de análisis de resultados.....	34
Capítulo 5: Resultados.....	36
5.1 Potencial erosivo RUSLE y determinación de GSS.....	36
5.2 Curva Número y obtención de GSF.....	41
5.2.1 Parámetros para la modelación en HEC-HMS	41
5.2.2 Obtención de gasto sólido de fondo	47
Capítulo 6: Conclusiones y Comentarios Finales.....	52
6.1 Conclusión	52
6.2 Comentarios Finales.....	53
Capítulo 7: Bibliografía	54
Anexo A: Construcción de capas RUSLE	59

Anexo B: Capas RUSLE.....	61
Anexo C: Histograma de valores por capa.....	66
Anexo D: Modelo HEC-RAS, batimetría	69
Anexo E: Curva granulométrica M5, estudio INH.....	70
Anexo F: Cálculo de GSF.....	72

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Los incendios forestales que han afectado a nuestro país este último tiempo evidencian un nuevo nivel de catástrofe en cuanto a la severidad de daño causado. El incendio ocurrido en la región del Maule el año 2017, es sin duda uno de los desastres naturales más grandes que se tenga registro en la última década. Los cambios significativos en la cobertura vegetal y condiciones de infiltración del suelo afectado están estrechamente ligados a variaciones en los regímenes naturales de cauces. Tal es el caso del aumento en la tasa de gasto sólido total, situación que serán objeto de análisis en esta tesis.

Informes realizados por el departamento de Agricultura en Estados Unidos, cuya realización tiene como principal móvil generar y proyectar planes de acción en corto y largo plazo ante desastres naturales (convocando grupos de investigación científica integrada), advierten variaciones importantes en las condiciones naturales de cuencas afectadas por incendios forestales, asociados principalmente a un súbito aumento de la temperatura en el sector afectado y a la eliminación parcial o total de cobertura vegetal sobre el terreno.

Diversos artículos logran plantear relaciones de incremento considerable en erosión de suelos y transporte de sedimentos desde una cuenca luego de un incendio forestal (Shakesby and Doer 2006, Shakesby et al. 2007), estos aumentos pueden explicarse fundamentalmente por variabilidades en la interacción de factores climáticos, topográficos, propiedades de suelo y cobertura de vegetación, alterando procesos hidrológicos y erosivos (Imeson et al. 1992, Benavides-Solorio and MacDonald 2001, Wondzell and King 2003).

Dicho lo anterior y observando el escenario que atraviesa Chile como lo es la extensa sequía, producto del cambio climático que afecta al mundo, se genera la motivación por realizar un estudio que permita individualizar y cuantificar los diferentes efectos producto de la modificación de las condiciones autóctonas de la zona posterior a un incendio forestal, específicamente aquellos que tiene relación con el arrastre de sedimentos del cauce como podría ser por ejemplo un aumento del área de las zonas de inundación del río, aspecto que ha sido objeto de estudio en memorias anteriores. La metodología de cálculo con que se efectuarán las investigaciones relacionadas a estos tópicos tiene como principal referencia el Informe “*Hydrologic Analyses of Post Wildfire Conditions*” (USDA,2016) y el libro “*River Mechanics*” (Julien, 2002).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Cuantificar el impacto que tuvieron los incendios forestales del año 2017 en los niveles de gasto sólido total en la cuenca del Río Maule.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Extrapolar estudios realizados en EE. UU a la situación de nuestro país, específicamente aquellos que pueden otorgar información sobre condiciones de terreno post incendio.
- Identificar principales procesos hidrológicos relacionados con la producción y transporte de sedimentos afectados a causa del incendio.
- Generar escenarios de aporte sedimentario post incendio a nivel de cuenca, contrastando lo obtenido con registros históricos sedimentométricas disponibles en la zona.

1.3 Organización del documento

La organización del presente documento se basa en seis capítulos, la descripción de cada uno de ellos es presentada a continuación:

Capítulo 1: Corresponde a una introducción en la que se describen algunos antecedentes respecto a estudios relacionados con el impacto de los incendios forestales, estableciendo las principales variaciones que repercuten en el gasto sólido total.

Capítulo 2: Se presenta una revisión bibliográfica de los temas que engloban los incendios forestales; contextos en que se generan, principales consecuencias estudiadas en el ámbito de la hidrología, entre otros. Se analiza el transporte hidráulico de sólidos: ¿en qué consta?, ¿cuáles son los tipos de transporte hidráulico y por qué se genera una distinción entre ellos?, formas empíricas de estimarlo, etc.

Capítulo 3: Se realiza una descripción de la zona de estudio, específicamente la cuenca del río Maule, lugar en que se desarrolla la presente investigación. Se establece su comportamiento hidrológico, datos meteorológicos y geomorfológicos, entre otros.

Capítulo 4: Se establecen las metodologías utilizadas en el estudio como lo es el modelo conjunto RUSLE/SDR, aplicado para la estimación de gasto sólido suspendido. Para la estimación de gasto sólido de fondo se emplearán modificaciones en la metodología de la curva número asociadas a efectos hidrofóbicos sobre suelos afectados por incendios.

Capítulo 5: Se presentan los resultados de haber aplicado las metodologías señaladas anteriormente, traducidas en calcular las variaciones entre el escenario base (sin afección) y el escenario modificado (alteración del incendio del año 2017). Se obtiene la tasa de variación del gasto sólido suspendido y del gasto sólido de fondo.

Capítulo 6: Se exponen las principales conclusiones del trabajo realizado, comentando las variaciones obtenidas para ambos procesos, se genera una discusión en torno a posibles directrices para trabajos futuros con el fin de complementar, robustecer y otorgar una mayor precisión a los resultados y alcances establecidos en esta memoria.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

2.1 Incendios Forestales

Los incendios forestales son eventos que han acompañado el desarrollo evolutivo del ser humano. En Chile los incendios forestales no son recientes, han estado presentes en diversas épocas, siendo utilizados por ejemplo como método de deforestación de grandes extensiones con el propósito de generar suelos propicios para la actividad agrícola/ganadera y también, para la eliminación de los residuos generados por los mismos (González & Veblen, 2007).

Con el paso de los años y el desarrollo de las grandes urbes, la recurrencia de este tipo de eventos ha aumentado, ya sea por origen natural o a causa de la acción del ser humano. Con el escenario actual que atraviesa nuestro país caracterizado por la gran sequía, junto con el aumento de los niveles de temperatura producto del calentamiento global y también, de las progresivas y constantes modificaciones que el hombre ha provocado en el uso de suelo como lo es la introducción de grandes hectáreas de plantaciones forestales, se ha generado un ambiente propicio para que este tipo de eventos sea desencadenado con mayor magnitud y frecuencia. El trágico incendio que afectó la zona centro-sur de Chile, mayormente a la región del Maule, entre los meses de enero y febrero del año 2017 es un ejemplo de la magnitud y poder destructivo que conllevan estos eventos. Particularmente la dimensión e intensidad que tuvo este devastador evento provocó la creación de una nueva tipología de incendio, hablamos de los denominados “Incendios de Quinta generación” (CONAF, 2017).

Al generar una revisión de las principales investigaciones que se han generado en torno a los incendios forestales, el impacto en los regímenes naturales de las cuencas quemadas y los efectos que tiene la variación extrema de las condiciones naturales en que se generan procesos hidrológicos dentro de ellas, es posible encontrar principalmente términos asociados a; erosión de suelos, transporte de sedimentos, generación de exceso de escorrentía producto de capas hidrofóbicas formadas sobre suelo quemado, disminución de humedad relativa del mismo, procesos de recuperación de ecosistemas afectados (Prosser & Williams, 1998), entre otros.

2.2 Severidad de Incendio

Se define la severidad de un evento de incendio como la incidencia que tiene el efecto del fuego sobre un ecosistema determinado tomando en cuenta procesos físico, químicos y biológicos. Los niveles de severidad pueden ser clasificados como altos, moderados o bajos (DeBano et al., 1998).

La Figura 2.1 presenta la relación directa que existe entre la severidad de incendio y el aumento de cargas sedimentarias transportadas y/o depositadas en cuencas quemadas.

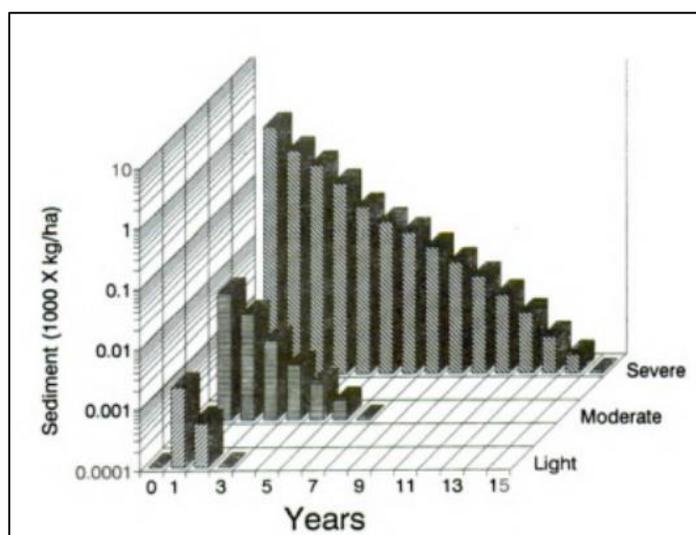


Figura 2.1: Incremento Promedio de Sedimentos en el tiempo relacionado con diferentes severidades de fuego asociada a incendios forestales (DeBano et al., 1998).

La severidad de incendio se establece como los efectos que genera el paso de este último una vez extinto (ver Figura 2.2). La severidad de incendio puede ser cuantificada mediante la variación del índice Normalizado de Área Quemada (diferencia Normalized Burn Ratio o simplemente dNBR, como se mencionará en el desarrollo de este informe), el cual se establece como una relación entre bandas multiespectrales captadas por satélites en situaciones pre y post incendio, permitiendo visualizar cambios en la estructura de la vegetación y reflectividad del suelo (CONAF, 2017).

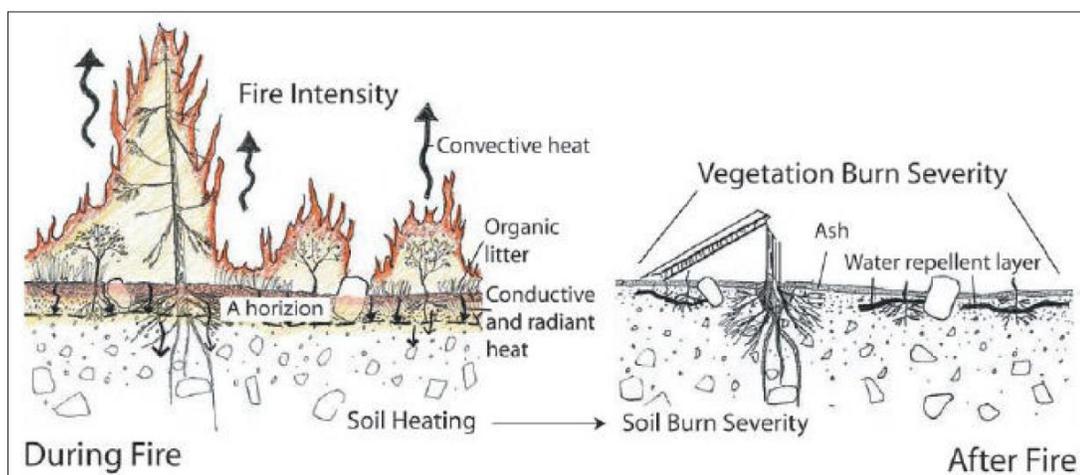


Figura 2.2: Diferenciación entre intensidad de fuego y severidad de incendio (Parsons, et al. 2010).

El cálculo del dNBR se obtiene mediante las ecuaciones (2.1) y (2.2):

$$\mathbf{NBR} = \frac{(\mathbf{NIR-SWIR})}{(\mathbf{NIR+SWIR})} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{dNBR} = \mathbf{NBR}_{\text{Pre-incendio}} - \mathbf{NBR}_{\text{Post-incendio}} \quad (2.2)$$

donde *NBR* corresponde al Normalized Burn Ratio o índice Normalizado de Área Quemada, *NIR* es Near Infrared o banda infrarroja cercana, capaz de captar el reflejo provocado por distintos tipos de vegetación, y *SWIR* es Short wave infrared o banda infrarroja lejana, que permite establecer la absorción generada por la presencia de vegetación. El dNBR, presentado en las secciones anteriores, corresponde a la resta de ambas capas satelitales en un momento previo al incendio y posterior a este.

La Tabla 2.1 muestra la relación del valor del dNBR con la severidad del incendio que genera las modificaciones de cobertura vegetal, propuesta por Key & Benson (2006)

Tabla 2.1: Severidad de quemado según valores de coeficiente dNBR (Key & Benson, 2006).

Valor dNBR	Severidad
<-0.25	Alto nivel de recuperación post incendio
-0.25 a -0.1	Bajo nivel de recuperación post incendio
-0.1 a 0.1	No quemado
0.1 a 0.27	Severidad Baja
0.27 a 0.44	Severidad moderada a baja
0.44 a 0.66	Severidad moderada a alta
> 0.66	Severidad alta

La variación de densidad de vegetación, captada por el manejo de imágenes satelitales, puede ser categorizada mediante la Clasificación de Reflectancia de Áreas Quemadas o Burned Area Reflectance Classification (en adelante BARC, por sus siglas en inglés). Esta clasificación, propuesta por el Burned Area Emergency Response (BAER) del departamento de servicios forestales en conjunto con el Ministerio de Agricultura de Estados Unidos, es utilizada como recurso para la creación de mapas de severidad de fuego (Figura 2.3).

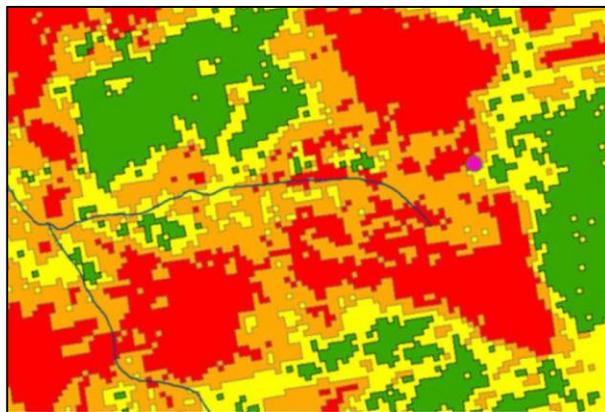


Figura 2.3: Representación de la severidad de incendio en zona afectada mediante análisis satelital; pixeles rojos representan alta severidad, naranjos severidad moderada, amarillos severidad baja y verdes zonas no quemadas (USDA, 2016).

Las clases con las que se puede clasificar dicha variación son generalmente 3 y se definen a continuación mediante la interpretación de Parsons et al. (2010):

Severidad de fuego baja: Las capas orgánicas superficiales no se consumen por completo y las raíces generalmente no cambian debido a la mínima penetración de calor en el suelo. Si bien el suelo mineral expuesto puede parecer ligeramente carbonizado, la capa superior de las hojas de los árboles y la vegetación del sotobosque generalmente parecen inalterados.

Severidad de fuego moderada: Se puede consumir hasta el 80% de la cobertura del suelo antes del incendio. Las raíces se pueden quemar, pero generalmente no se consumen por completo y la estructura del suelo no cambia.

Severidad de fuego alta: Por lo general, se consume toda o casi toda la cobertura del suelo anterior al incendio, junto con raíces de hasta 0,1 pulgadas (0,25 cm) de diámetro. La carbonización puede ser visible en raíces más grandes. Se expone una gran cantidad de suelo desnudo o cubierto de cenizas y la estructura del suelo es menos estable debido a la pérdida de masa de raíces.

2.2 Transporte Hidráulico de Sólidos

La dinámica de los procesos naturales que ocurren en nuestro planeta es sin duda alguna la evidencia de un constante cambio de nuestro entorno. Los diferentes ríos que existen en el mundo no sólo transportan agua sino también material sedimentario que es trasladado desde las zonas de erosión hacia las zonas de deposición provocando procesos degradativos y agradativos en la morfología de los cauces (ver Figura 2.4).

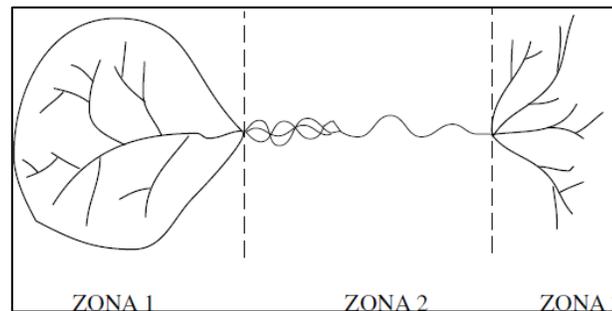


Figura 2.4: Sistema fluvial idealizado; Zona 1, producción de sedimentos. Zona 2, transferencia. Zona 3, deposición (Niño, 2004).

Tal como se ha mencionado anteriormente, la remoción de cobertura vegetal total o parcial en cuencas que se han visto afectadas por incendios de diversa magnitud, provocan un aumento en los efectos erosivos generados por procesos como la lluvia o el viento. El principal medio por el que existe aporte sedimentario hacia los cauces es el lavado de cuencas, como se le denomina al acarreo de sedimentos generado por procesos erosivos, mediante el exceso de escorrentía superficial.

Los parámetros geomorfológicos de la cuenca como el área de drenaje, la pendiente, el uso de suelo junto con la precipitación media en la zona son claves para la estimación de la cantidad de sedimentos por aportar, sin embargo, al ser cada unidad hidrológica un conjunto de procesos que se interrelacionan a diferentes escalas resulta complejo generar valores estimados que sean realmente exactos (Julien, 2002).

El tipo de material transportado por cauce varía según su tamaño siendo los más pequeños limos y

arcillas, pasando por tamaños medios como arenas y finalmente partículas de gran tamaño como son las gravas y bolones.

Si las condiciones de escurrimiento en un canal aluvial (velocidad media de flujo, altura de escurrimiento, velocidad de corte, etc.) superan la condición umbral de arrastre entonces el fluido es capaz de inducir el transporte generalizado del sedimento del lecho, generando los procesos que serán descritos a continuación.

2.2.1 Gasto Sólido

La tasa de transporte de partículas en una determinada sección de río se denomina gasto sólido, el cual puede clasificarse en dos tipos según la forma en que se desarrollan: gasto sólido de fondo (en adelante GSF) asociado al transporte de sedimentos de tipo granulares o no cohesivo en el fondo del cauce, y gasto sólido en suspensión (en adelante GSS), asociado a sedimentos cohesivos, transportado en secciones transversales intermedias del escurrimiento.

2.2.1.1 Gasto sólido de fondo

Tal como se mencionó anteriormente, dicho proceso de transporte está asociado a tipos de sedimentos no cohesivos como son las gravas, arenas y bolones. Este tipo de transporte debe su nombre a la sección en que se desarrolla (fondo del lecho) dado el peso que tienen las partículas. El gasto sólido de fondo se puede desarrollar en 3 modalidades: deslizamiento sin rotación, deslizamiento con rotación y saltación (Niño, 2020).

Dado el mecanismo con que se produce el gasto sólido de fondo en el lecho, su medición es hasta ahora un problema difícil de abordar. Diferentes autores, gracias a múltiples ensayos en laboratorio, han podido generar formulaciones empíricas para su análisis, considerando principalmente las relaciones entre densidades (del sólido y el agua) y el diámetro característico del sedimento transportado. Se presentan a continuación las ecuaciones (2.3) a (2.11), utilizadas para la determinación de gasto sólido de fondo:

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{g \cdot R \cdot d_s^3}} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (2.4)$$

Donde:

$q_s [M/L^3]$ = gasto sólido volumétrico

$q_s^* [-]$ = gasto sólido volumétrico adimensional

$R [-]$ = densidad relativa

$\rho_s \left[\frac{M}{L^3} \right]$ = Densidad del sólido

$\rho \left[\frac{M}{L^3} \right]$ = Densidad del agua

$d_s [L]$ = diámetro característico del sedimento

- Meyer-Peter y Müller (1948)

$$q_s^* = 8 \cdot (\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (2.5)$$

- Ashida y Michiue (1972)

$$q_s^* = 17 \cdot (\tau_* - \tau_{*c}) \cdot \left(\tau_*^{1/2} - \tau_{*c}^{1/2} \right) \quad (2.6)$$

- Fernández-Luque y van Beek (1976)

$$q_s^* = 5.7 \cdot (\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (2.7)$$

- Engelund y Fredsoe (1976)

$$q_s^* = 18.74 \cdot (\tau_* - \tau_{*c}) \cdot (\tau_*^{1/2} - 0.7 \tau_{*c}^{1/2}) \quad (2.8)$$

τ_* corresponde al esfuerzo de corte de fondo adimensional y se calcula como:

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{g \cdot R \cdot d_s} \quad (2.9)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.10)$$

$$\tau_0 = \gamma \cdot H \cdot \sin(\alpha) \quad (2.11)$$

τ_0 es el esfuerzo de corte de fondo, u_* la velocidad de corte y τ_{*c} el esfuerzo de corte crítico para generar la condición de arrastre de las partículas. Este último parámetro adquiere valores empíricos dependiendo del autor siendo estos 0.048, 0.05, 0.05 a 0.058 y 0.05 en el orden de las ecuaciones (2.5) a (2.8) presentadas anteriormente.

2.2.1.2 Gasto sólido suspendido

El gasto sólido suspendido (GSS) se encuentra asociado a los tipos de sedimentos de menor escala como lo son arcillas o limos. Dado su tamaño reducido a diferencia de otros tipos de sedimentos vistos en el gasto sólido de fondo, las fuerzas electroquímicas a las que se encuentran sometidas las partículas adquieren una importante relevancia en comparación a la componente peso de estas al momento de desarrollar el equilibrio de fuerzas.

Tradicionalmente, se ha establecido la relación entre el caudal que transporta un determinado cauce con el gasto sólido suspendido según lo presentado por la ecuación 2.13:

$$G_{SS} = A * Q^B \quad (2.13)$$

Donde:

$G_{SS} \left[\frac{m^3}{s} \right]$ = Gasto sólido suspendido

$Q \left[\frac{m^3}{s} \right]$ = Caudal líquido aforado en sección de medición

A, B[-] = Constantes generalizadas a partir de curva representativa .

Existen dos modalidades de medición para el gasto sólido suspendido, las cuales se describen a continuación:

Muestreos Superficiales o Abreviados: consisten en la toma de muestras puntual de agua del río en una botella desde la superficie libre del flujo, este tipo de muestreo es realizado diariamente. En nuestro país se conoce por la DGA como muestreo rutinario y no requiere de un observador necesariamente experto en el área. La metodología que describe los pasos que describen la forma de medición son descritos por el Manual De Terreno y Centros de Filtrado (Sandoval & Solar, 1988; Solar, 1999).

Muestreos en Profundidad: conocido como "muestreo de llenado continuo de la botella en toda la vertical, en su viaje de ascenso y descenso", es un proceso de medición realizado por un hidromensor de manera periódica con una frecuencia mensual que permite caracterizar el transporte en la totalidad de una columna vertical de escurrimiento, utilizando instrumentos específicamente diseñados para esta labor.

Capítulo 3: Zona de Estudio

3.1 Descripción zona de estudio

La cuenca del río Maule pertenece a la VII Región y posee una superficie de 20.295 km² siendo aproximadamente un 30% de este valor áreas sobre la línea de nieves. Es la cuarta cuenca más grande del país (MOP, 2004) siendo su principal cauce el río Maule, que tiene una extensión de 240 kms.

El río Maule se origina como efluente de la Laguna del Maule ubicada a una altura aproximada de 2233 [m.s.n.m] en pleno Cordón montañoso de Los Andes. A 31 km de su nacimiento, se une el río Puelche tomando un rumbo Oeste-Norte-Oeste que mantiene hasta la desembocadura. A 90 km de su origen, el Río Maule expande su cauce para atravesar en un recorrido de 80 km la llanura aluvial del valle central y penetrar en la cordillera de la Costa, donde se une por el norte el río Claro, uno de los más importantes tributarios. A partir de esa junta, corre confinado por cerros de la cadena costera y sólo en sus 10 últimos kilómetros se ensancha en un estuario que en su boca tienen cerca de 900 m de ancho. En sección que transita por la cordillera de la Costa, el río Maule recibe escasos afluentes que sólo llevan agua en la época de lluvias; el principal es el estero Los Puercos, que drena el amplio valle de Penciahue. En cambio, los más importantes tributarios provienen de la cordillera andina, aunque muchos de ellos se le unen en la Depresión Intermedia.

El régimen del río Maule varía a lo largo de su desarrollo desde Este a Oeste; es nivo – pluvial en la parte alta de su cuenca, caracterizado por la estación fluviométrica Maule en Armerillo. En su parte media adopta un régimen mixto antes de la junta con el río Loncomilla en la estación Maule en Longitudinal, siguiendo finalmente un régimen pluvial en su parte baja, debido a la influencia del río Loncomilla.

La Figura 3.1 establece la hoya hidrográfica de la cuenca en estudio.

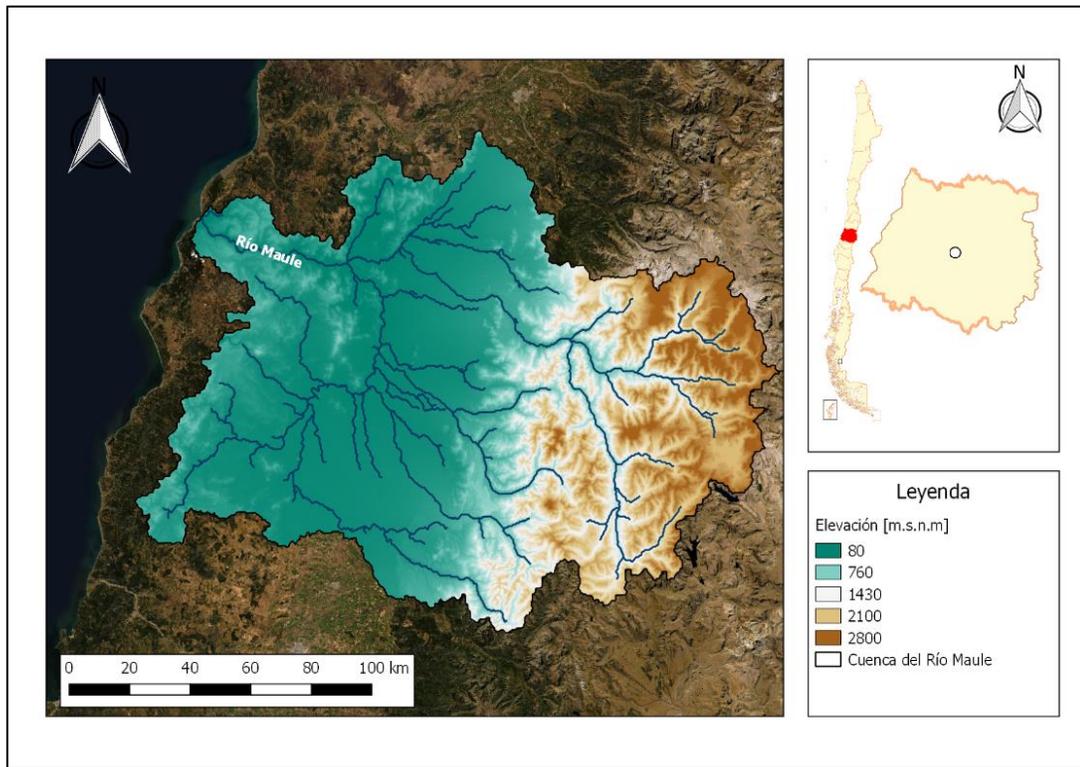


Figura 3.1: Hoya hidrográfica de la Cuenca del río Maule.

La cuenca del río Maule se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo, existiendo al menos dos meses consecutivos del verano con déficit hídrico.

La condición geomorfológica general determina la existencia de ombroclimas (climas dependientes de lluvia o precipitaciones) que varían de húmedo a sub-húmedo, dependiendo de los montos de precipitación registrado. Las variaciones pluviales sumadas a las diferencias térmicas que ocurren en la cordillera andina, especialmente en lo que se refiere a la amplitud térmica anual o continentalidad, definen en su conjunto dos tipos bioclimáticos en la cuenca:

- Mediterráneo pluviestacional – oceánico: influyendo los sectores costeros, la Cordillera de la Costa, el Valle Central y los pisos inferiores de la Cordillera de los Andes, bajo los 2000 m s.n.m.
- Mediterráneo pluviestacional – continental: se encuentra en las zonas andinas altas por sobre los 2000 m.s.n.m, cuyo régimen ombrotérmico está dado por el efecto que ejerce la altitud sobre la continentalidad.

Las características de continentalidad hacia el interior (Valle Longitudinal y Precordillera) hacen que los contrastes térmicos sean más acentuados que en el litoral. La temperatura media anual es de 14.9° C, con una máxima de 22.8° C y una mínima de 8° C. El período seco es de seis meses y la precipitación promedio anual es de 735 mm.

La distribución temporal de la precipitación y temperatura media mensual medida en la ciudad de Talca es presentada a continuación, en la Figura 3.2:

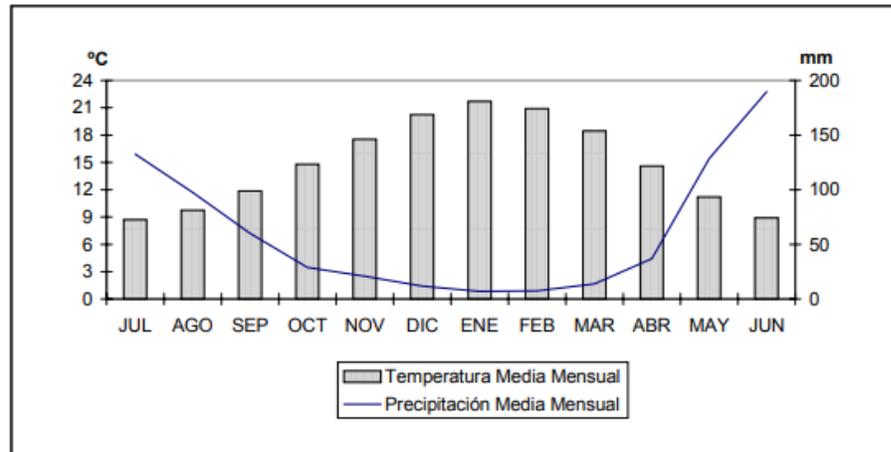


Figura 3.2: Montos de precipitación y temperaturas medias mensuales para la ciudad de Talca (MOP, 2004).

3.2 Información hidrometeorológica y sedimentométricas disponible.

3.2.1 Información estaciones de monitoreo

Con el objetivo de caracterizar los regímenes de la zona de estudio, se procede a realizar un catastro de la información hidrometeorológica de la zona de estudio. La estación fluviométrica que congrega la mayor área de la zona de estudio corresponde a río Maule en Forel (código BNA 07383001-K), cuyo funcionamiento va desde el año 1985 hasta la actualidad.

El monitoreo de esta estación se vio afectado durante el año 2017 debido a la destrucción total de la estación por efecto del incendio del mismo año. Sus coordenadas son 753.310 Este y 6.078.143 Norte (Datum WGS 94 UTM 18 S).

La Figura 3.3 muestra la distribución de estaciones meteorológicas, fluviométricas y sedimentométricas presentes en la cuenca del río Maule.

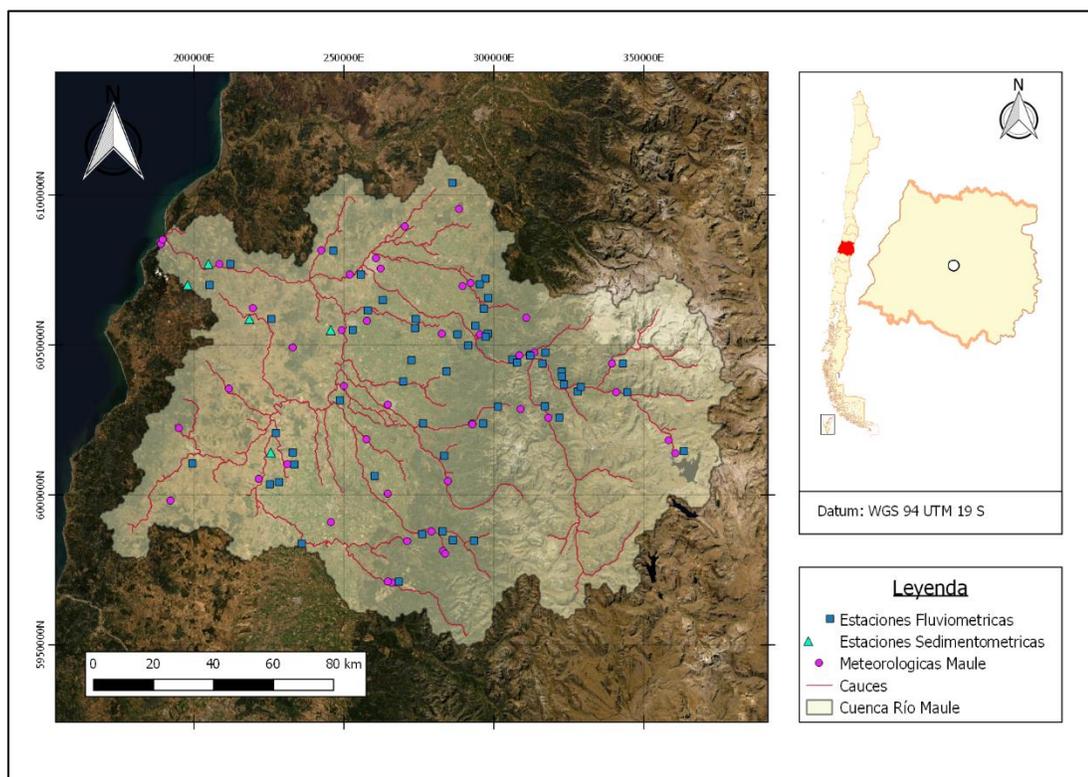


Figura 3.3: Distribución espacial de las estaciones de monitoreo en la cuenca del río Maule.

El análisis de los datos obtenidos por la estación Maule en Forel refleja un régimen pluvial en secciones del río Maule cercanas a la desembocadura, en la ciudad de Constitución, obteniendo los mayores caudales de registro durante entre los meses de junio y agosto (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Probabilidad de excedencia para caudales medidos en estación Maule en Forel.

	Probabilidad de Excedencia Caudales Por Mes [m3/s]											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
5%	796	826	1467	3018	10338	11206	16556	13723	4367	3028	1596	905
25%	340	278	321	680	1553	5209	3197	3443	2108	766	704	558
50%	281	199	278	374	649	2018	1756	1415	1074	600	493	410
80%	166	126	171	307	383	1069	868	808	475	480	324	281
95%	64	60	134	146	203	307	311	289	306	222	152	76

La Figura 3.4 presenta la curva de variación estacional obtenida según los registros tabulados anteriormente para la cuenca en estudio:

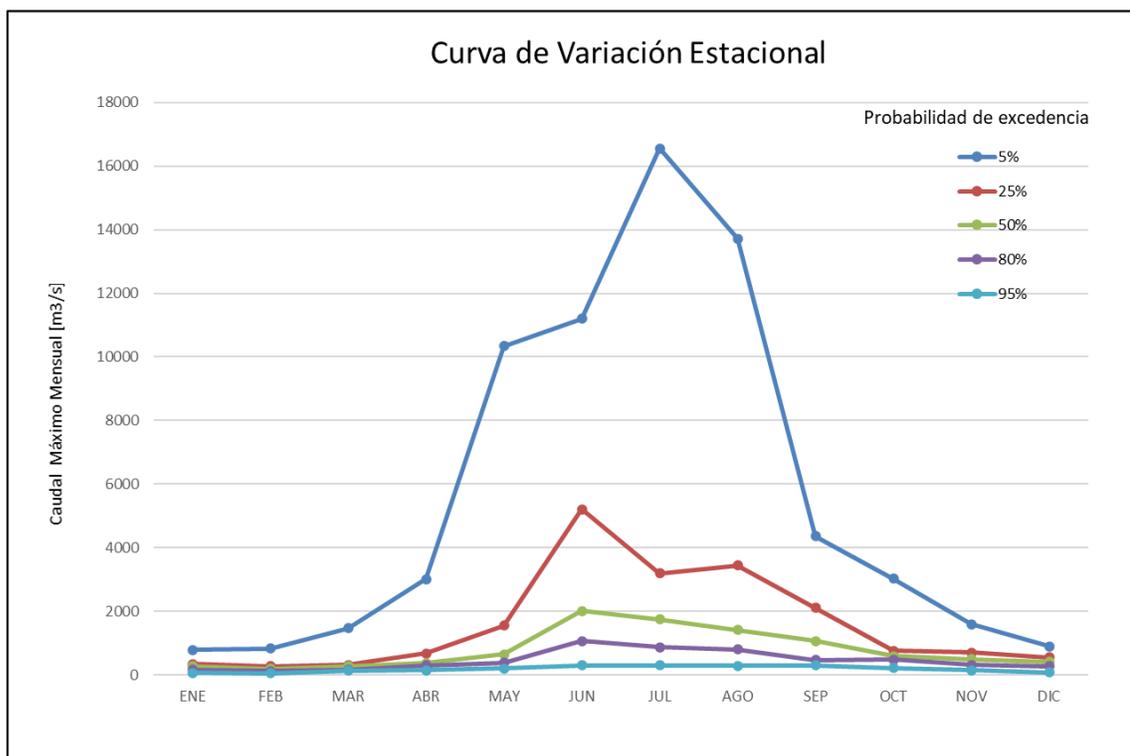


Figura 3.4: Curva de Variación estacional para estación Maule en Forel según datos extraídos de la DGA.

3.2.2 Información Sedimentométrica en la zona de estudio.

La disponibilidad de información sedimentométricas que detalle los comportamientos a nivel anual de GSS (gasto sólido suspendido) es vital para caracterizar escenarios en régimen natural y contrastarlas con la situación post incendio en la zona de estudio. Para efectos de esta investigación, poseer la mayor cantidad de datos y con la mejor resolución temporal permitirá caracterizar en mejor medida las tasas de cambio provocadas en los valores de GSS posterior al incendio.

La estación Maule en Forel tiene dentro de sus registros muestreos sedimentométricos de tipo integrado desde el año 1988 hasta la fecha. La naturaleza de este monitoreo establece frecuencias de medición mensual, sin embargo, tal y como se muestra en la Figura 3.5, existen meses durante ciertos años en que no se alcanza a cubrir un registro completo (años incompletos con menos de 12 mediciones).

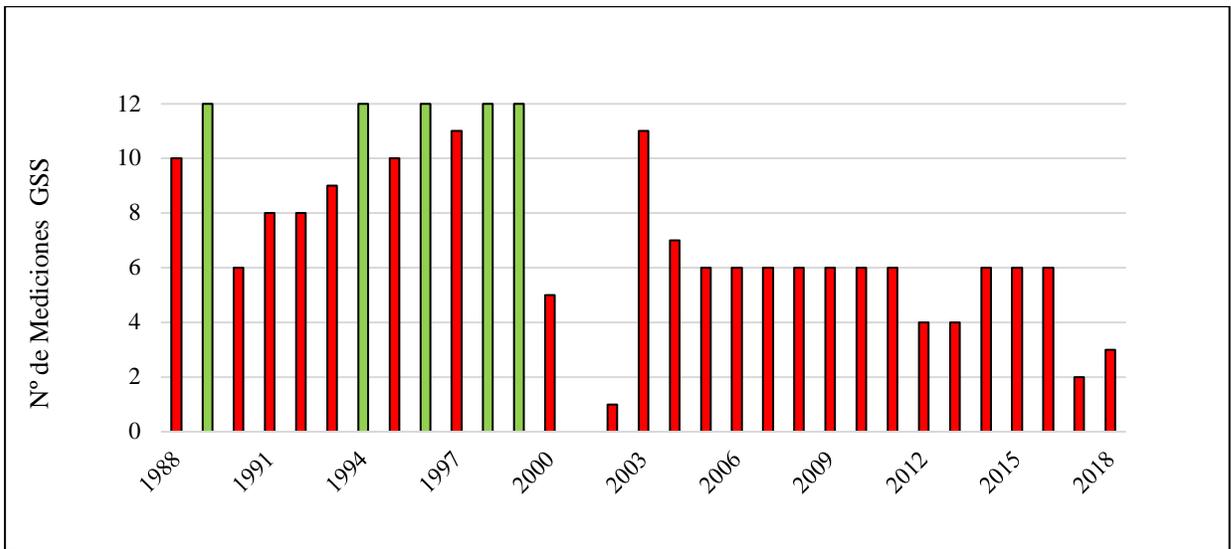


Figura 3.5: Muestréos Integrados Mensuales por año en estación Maule en Forel, en verde años completos y en rojo años con mediciones incompletas.

En base a lo anteriormente señalado, se procede a verificar la disponibilidad de información sedimentométrica en el resto de la cuenca río Maule. Se encuentra la estación Río Loncomilla en las Brisas (Código BNA 07359001-9) la cual mantiene un registro sedimentométrico rutinario diario, no siendo afectada por el incendio del año 2017.

Cabe señalar que la cuenca del Río Loncomilla forma gran parte de la cuenca del río Maule manteniendo los mismos regímenes hidrológicos y similitudes geomorfológicas. Al generarse esta similitud de cuencas, se establece la hipótesis de aplicabilidad del modelo conjunto RUSLE/SDR en base a su rendimiento, con respecto a los valores medidos en la zona. Lo anterior se aplica al caso en estudio al comparar el registro de GSS en la estación río Loncomilla en las Brisas con el monto total que se obtiene mediante el modelo mencionado.

Capítulo 4: Metodología de trabajo

4.1 Método conjunto RUSLE/SDR

Con el propósito de evidenciar los efectos del incendio forestal del año 2017, recopilando factores característicos de la cuenca como suelo, vegetación y clima, es que se procede a implementar un método empírico validado por la comunidad científica y que además tenga la facilidad de establecer modificaciones en la información de entrada, permitiendo construir los escenarios necesarios para el análisis.

Fijadas las características del método que se desea utilizar y luego de una extensa revisión de artículos científicos que abordan los procesos erosivos en zonas afectadas por incendios forestales, es que se llega a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (o USLE por sus siglas en inglés). Dicha ecuación, formulada por Wischmeier y Smith en 1960 y promovida por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), tiene como objetivo estimar la pérdida promedio anual de suelo por efecto de erosión en terrenos que han sido destinados a la agricultura o han sufrido algún tipo de alteración/manejo antropogénico.

Luego de su publicación, diversos estudios científicos basados en erosión de suelos alrededor del mundo fueron alimentando la aplicación a nivel global de dicha metodología. En base a esto y a diferentes correcciones es que se publica una versión "mejorada" denominada Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada o RUSLE (Renard et al., 1993). La ecuación RUSLE incorpora modificaciones a los factores que componen cada capa según calibraciones realizadas en terreno, en las investigaciones que han requerido su aplicación (ver Figura 4.1).

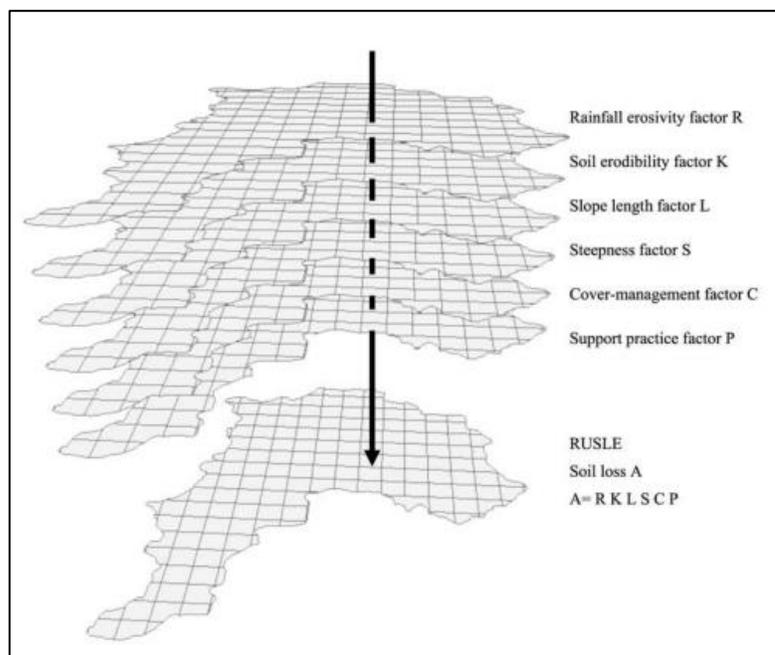


Figura 4.1: Factores para el cálculo de suelo erosionado anual mediante metodología RUSLE (Renard., 1993)

La estructura básica de RUSLE mantiene la relación de los componentes establecida por USLE (Ecuación 4.1) pero a diferencia de este último, añade procesos de componentes auxiliares como lo es el cálculo de erosionabilidad de suelo como variante temporal, al igual que el crecimiento de plantas y descomposición de residuos. Se añaden mejoras en los valores de erosividad provocada por precipitación (factor R) y nuevas metodologías para el cálculo de componentes topográficas (factor LS).

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (4.1)$$

Donde:

$A \left[\frac{\text{Ton}}{\text{ha. año}} \right]$ = valor promedio de pérdida de suelo anual

$R \left[\frac{\text{MJ. mm}}{\text{ha. h. año}} \right]$ = índice de erosividad de la lluvia

$K \left[\frac{\text{Ton. ha. h}}{\text{ha. MJ. mm}} \right]$ = índice de erodibilidad del suelo

LS [-] = factor de relieve topográfico

C [-] = factor de cobertura vegetal

P [-] = factor de manejo de suelos (remediación)

Hoy en día es recurrente la utilización de modelos físicos en el desarrollo de investigaciones ligadas a procesos hidrológicos. Respecto a un mejor rendimiento que podría tener un modelo físico como lo es WEPP versus un modelo empírico como RUSLE en la estimación de pérdida de suelo por erosión, estudios como los realizados por Tiwari et al. (2000) quienes, utilizando un total de 2000 datos anuales extraídos de 208 datos de escorrentía natural, establecen que el modelo más complejo de predicción de erosión por lluvia (modelo WEPP) no presenta un mejor rendimiento comparado con lo entregado por modelo empírico RUSLE.

La metodología RUSLE permite estimar, bajo un modelo empírico, el potencial erosivo promedio del suelo a escala anual. Este tipo de metodologías resulta efectiva dada la simplicidad y practicidad en comparación a modelos físicos, adicionando la accesibilidad universal que se tiene a los datos que trabajan como inputs para su desarrollo versus la larga recopilación de datos que requieren los modelos de base física (Renard 1997; Tamene and Le 2015).

Finalmente, sus numerosas aplicaciones en diferentes partes del mundo además de una basta cantidad de estudios científicos relacionadas con el análisis y perfeccionamiento de sus factores, aplicabilidad y técnicas de medición terminan por entregar las garantías de ser utilizado para el desarrollo de esta investigación.

Una de las limitantes que es posible evidenciar en la metodología RUSLE radica en que, al igual que su predecesor USLE, permite sólo interacciones básicas (multiplicativas) entre los factores que las constituyen (Nearing, 2004) sin embargo, para efectos de estimación resulta ser una herramienta viable. Ya que el objetivo de esta memoria será estimar la variación de gasto sólido total (suspendido y de fondo) y no solamente la cantidad de material erosionado por efecto del incendio es que hace necesario complementar el rango de aplicación del modelo RUSLE, para lo cual se contempla la inclusión del Índice de Aporte Sedimentario o Sediment Delivery Ratio (en adelante mencionado por sus siglas en inglés como “SDR”).

El índice de aporte sedimentario o SDR es una relación entre la erosión potencial y la erosión neta que considera los mecanismos de depositación de sedimentos dentro de una cuenca (Figura 4.2). La aplicación de este índice permite reducir de manera proporcional al área de la cuenca la cantidad de suelo erosionado obtenido por el modelo RUSLE considerando deposiciones en diferentes secciones de esta.

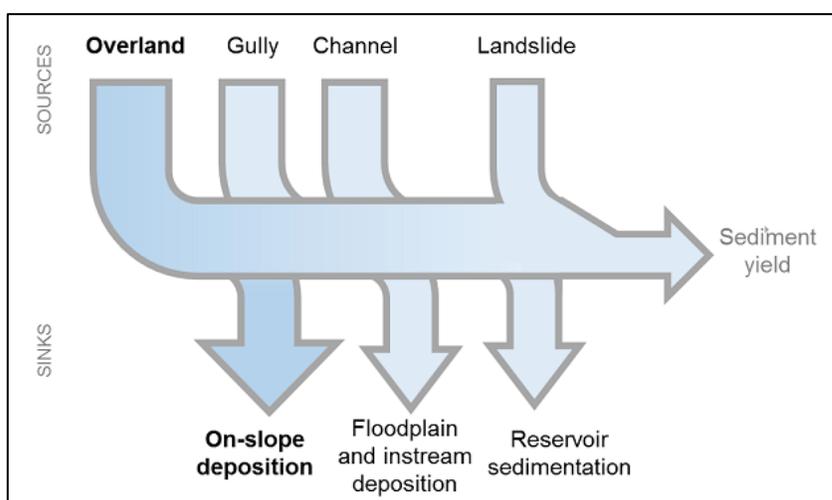


Figura 4.2: Procesos considerados por índice SDR para obtención de aporte sedimentario (Sharp et. Al., 2018)

Existen diversos métodos para calcular el índice de aporte sedimentario SDR, algunos de ellos son presentados a continuación en la Tabla 4.1

Tabla 4.1: Métodos planteados según autores para la estimación del índice SDR.

Método/Año	Fórmula
Vanoni (1975)	$SDR = 0.472 \cdot W^{-0.125}$
USDA (1972)	$SDR = 0.5656 \cdot W^{-0.11}$
Renfro (1975)	$\log(SDR) = 1.7935 - 0.14191 \cdot \log(W)$
USDA (2002)	$SDR = 0.51 \cdot W^{-0.11}$

Donde W es el área de la cuenca en km²

Con el objetivo de establecer una mejor correlación entre los datos post-incendio, que han sido extrapolados del informe “*Hydrologic Analyses of Post Wildfire Conditions*” del Departamento de Agricultura de Estados Unidos y los resultados obtenidos para la cuenca afectada en nuestro territorio, es que se utiliza el índice de aporte sedimentario propuesto por la USDA (2002).

Se procede a establecer la utilización del modelo conjunto RUSLE/SDR que incorpora los procesos de transporte y depositación de sedimento (Kamuju 2016; De Rosa et al. 2016) teniendo como origen de generación el efecto erosivo de las precipitaciones en la cuenca de estudio.

El valor total de material erosionado de la cuenca en estudio (A) en la ecuación (4.1) será el valor obtenido mediante la metodología RUSLE para los escenarios pre y post incendio.

Dicho lo anterior, la ecuación (4.2), permite obtener la erosión neta para los escenarios pre y post incendio.

$$S_y = SDR * A \quad (4.2)$$

Donde:

$S_y \left[\frac{\text{Ton}}{\text{ha/año}} \right]$ = Erosión neta de la cuenca

$A \frac{\text{Ton}}{\text{ha/año}}$ = Erosión Potencial de la cuenca

4.1.1 Información Satelital y Cálculo de Factores

El origen de los recursos satelitales adecuados depende del factor que se desee obtener. En el caso de este estudio, las principales organizaciones que brindan fuentes de información son el sitio web IDE (Infraestructura de Datos Espaciales), la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), el Instituto Nacional de Hidráulica (INH), el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

4.1.1.0 DEM de la zona de estudio

La obtención del modelo de elevación digital de la zona es clave al momento de realizar todo tipo de investigación. La aplicación de la metodología RUSLE requiere de un archivo DEM que otorgue información sobre las direcciones de flujo con el objetivo de obtener el factor LS (length-slope). Basado en las mismas direcciones de flujo es posible delimitar cuencas y subcuencas además de la visualización de cauces principales y tributarios en el área de estudio.

Para crear el DEM de la zona se procede a buscar en el sitio EarthData de la NASA, todos los satélites cuya ruta permite la disponibilidad de información en la región. Para este caso, el satélite Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) permite recopilar datos topográficos con una resolución espacial de 30 metros por píxel, dimensión apropiada para los cálculos estimativos a realizar en esta sección de análisis.

Los archivos son bajados por sector, una vez descargados todos, se procede a confeccionar el DEM de la cuenca del río Maule mediante la herramienta de unión de capas ráster de QGIS versión 2.18.

4.1.1.1 Severidad de Incendio

La severidad de incendio correspondiente al evento del año 2017 es obtenida gracias al catástro y posterior análisis satelital generado por el Instituto Nacional de Hidráulica en conjunto con CONAF y MOP (a través de su dirección de Planeamiento, DIRPLAN). En un trabajo mancomunado entre las entidades mencionadas, se logra calcular el NBR asociado al incendio forestal que afectó la cuenca del río Maule, obteniendo finalmente el índice dNBR con el que es posible contrastar las situaciones pre y post incendio basado en el cambio de cobertura vegetal percibida y estados de suelo natural.

Es importante destacar que la acción conjunta del trabajo en terreno es de vital importancia, ya que permite contrastar y validar los estudios que tengan como origen de sus recursos la percepción remota satelital, con aquellas observaciones que establezcan lo sucedido en la zona de estudio.

Las labores respecto a la severidad de incendio finalizan con una clasificación BARC de 4 clases basada en el dNBR simplificado obtenido, dicha clasificación separa las zonas que fueron afectada según severidad de incendio nula, baja, media y alta (Figura 4.3). Este proceso es relevante para la obtención del escenario posterior al incendio.

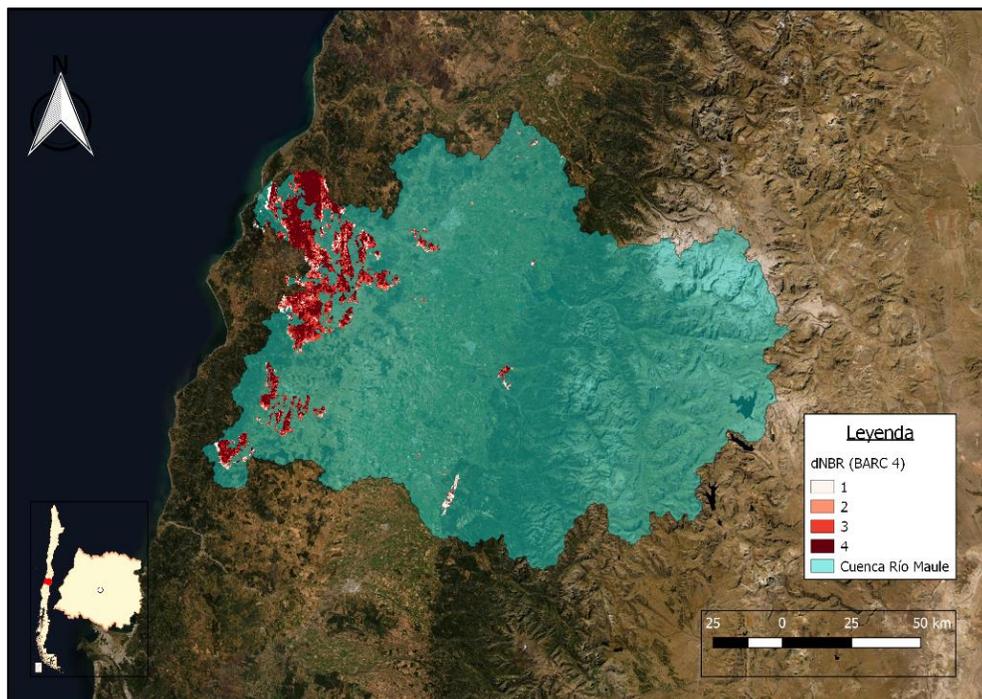


Figura 4.3: Dispersión espacial de zonas incendiadas bajo distintos índices de severidad de incendio.

4.1.1.2 Precipitación media Anual y Factor de Erosividad de Lluvia (R)

La precipitación, junto con el viento, constituye uno de los agentes más importantes en la acción erosiva de suelos. La metodología RUSLE recoge únicamente la acción erosiva pluvial en el factor R (Rainfall-runoff erosivity) determinándolo tradicionalmente como un promedio de la suma anual del producto de la energía cinética de una tormenta (E) y su máxima intensidad de 30 min (I_{30}), conocida como EI_{30} (Bonilla, 2011).

A raíz de la escasa cantidad de estaciones pluviométricas en la zona que permitan obtener mediciones con una resolución temporal menor a 30 min, es que se propone la utilización de la metodología desarrollada por Bonilla y publicada en su artículo “Rainfall erosivity in Central Chile” en el año 2011.

El estudio recopila información de 16 estaciones meteorológicas disponibles en la zona central de Chile registrando un total de 5400 tormentas en 270 años de registro conjunto. Los resultados entregan un procedimiento empírico capaz de predecir el valor de R con una gran precisión (ver Figura 4.4) obteniendo una Eficiencia de Modelo (ME) igual a 0.867 para las 16 estaciones dentro de las zonas de estudio (Nash and Sutcliffe 1970).

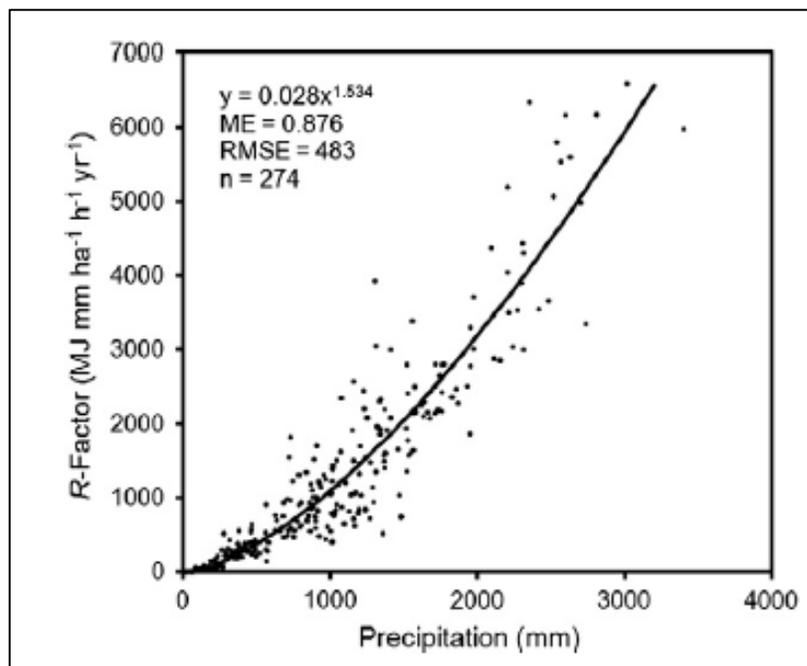


Figura 4.4: Relación entre valores calculados de factor R y precipitación anual para registro continuo en 16 estaciones de la zona de estudio (Bonilla et al., 2011).

La regresión que propone Bonilla (2011), expresada en la ecuación (4.3) para la obtención del factor R es:

$$R = \alpha P^\beta \quad (4.3)$$

Donde R corresponde al factor de Erosividad de lluvia (cuyas unidades son $MJ mm ha^{-1} h^{-1} año^{-1}$), P es la precipitación media anual (medida en milímetros) y los factores α y β corresponden a parámetros variantes según la zona de influencia de alguna de las 16 estaciones contenidas en el estudio (Tabla 4.2).

Para efectos de aplicación en la zona incendiada y dado un criterio de cercanía con la misma, se escogen los parámetros ligados a la estación Colorado (ME=0.93) cuyos valores son 0.152 y 1.32 respectivamente.

Tabla 4.2: Parámetros para cálculo de Erosividad obtenidos en base al registro anual de precipitaciones (Bonilla ,2011).

Rain gauge station	Length of record (yr)	<i>a</i>	<i>b</i>	RMSE	ME
El Sobrante	16	0.171	1.212	71	0.60
Lliu-Lliu	19	0.089	1.463	149	0.96
Pirque	18	0.104	1.299	64	0.81
Melipilla	20	0.144	1.274	81	0.82
Rengo	16	0.596	1.044	81	0.78
C. Las Nieves	20	0.370	1.145	158	0.81
Colorado	17	0.152	1.320	199	0.93
Bullileo	22	0.060	1.441	745	0.79
Chillán	11	0.060	1.394	221	0.47
Caracol	16	0.152	1.307	616	0.77
Coihueco	17	0.491	1.163	626	0.47
Diguillín	15	0.577	1.142	589	0.66
Quilaco	16	0.009	1.650	418	0.65
Cerro El Padre	14	0.513	1.135	461	0.56
El Vergel	20	0.363	1.129	162	0.69
Pueblo Nuevo	17	0.308	1.115	188	0.58
Entire study area	274	0.028	1.534	483	0.88

Posterior a escoger los parámetros adecuados según la locación de la cuenca afectada, se hace necesario un producto satelital que muestre la distribución de precipitación anual en la zona. Dicho producto es obtenido de la base de datos WorldClim y se basa en la investigación realizada por Fick et al. (2017), donde se obtuvo como resultado la distribución espacial georreferenciada de variables climatológicas a nivel mundial con una resolución de 1 km² en base a observaciones recopiladas del satélite MODIS.

Cabe destacar que los datos de precipitación con los que se trabajarán, provenientes de la investigación de Fick et al. (2017), han sido procesados, interpolados y validados mediante distintos métodos estadísticos.

La Figura 4.5 presenta un esquema sintetizado de los procesos mencionados para obtener este producto de variables meteorológicas:

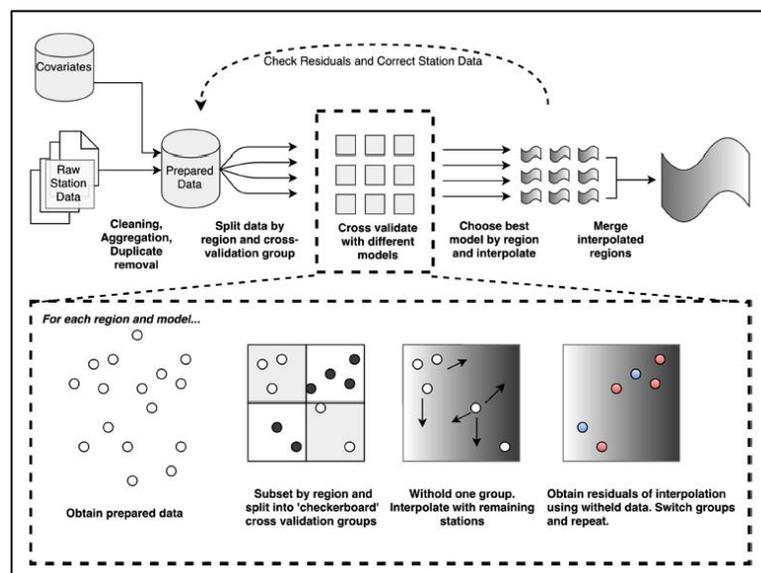


Figura 4.5: Procesamiento de datos de precipitación recopilados para creación de mapa, detalle esquematizado sobre validación cruzada aplicada (Fick et al. 2017).

Para efectos de esta memoria, se utilizaron los valores de precipitación mensual global obtenido para un periodo de tiempo desde 1970 hasta 2000, las capas de precipitación mensual obtenidas son sumadas y divididas por 12 (cantidad de meses en el año) con el fin de adquirir un producto satelital de precipitación media anual representativo. El producto global es delimitado por la cuenca del río Maule gracias a las herramientas disponibles en QGIS versión 2.18, obteniendo la precipitación media anual en la cuenca con una resolución de 1 km² para el periodo 1970-2000.

Finalmente, mediante la calculadora ráster de QGIS se aplica la regresión de la ecuación (4.3), consiguiendo el factor R para la zona de estudio.

4.1.1.3 Cobertura vegetal Nacional y Cálculo de Factor C.

La cobertura vegetal en la metodología RUSLE cumple el rol de resguardar el suelo de la acción erosiva, ya sea por efecto del viento o de la lluvia. La capa vegetal que cubre el suelo del sector a estudiar constituye un colchón amortiguador y disipador ante la liberación de energía cinética proveniente del impacto de las gotas de lluvias sobre la superficie, viéndose afectada/removida parcial o totalmente después de la ocurrencia del incendio del año 2017.

Es necesario antes de asignar un valor C de cobertura a la vegetación en la zona de estudio, tener un catastro del tipo de vegetación en dicha región. Dicho lo anterior se procede a obtener un producto georreferenciado que contenga los diferentes tipos de bosques y matorrales presentes en Chile encontrando el “Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014” desarrollado por el Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje (GEP) y la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza (FCFCN) de la Universidad de Chile.

El producto mencionado anteriormente contempla un archivo ráster con resolución espacial por píxel de 30 m y abarca todo Chile continental. La información que contempla sintetiza 3 niveles de categorización de vegetación con un número determinado de clases, basado en las clasificaciones propuestas por Di Gregorio (2005).

El factor C mide los efectos de todas las variables de gestión y cobertura interrelacionadas (Renard et al., 1997). y corresponde a la relación entre la pérdida de suelo de la tierra cultivada en condiciones específicas de manejo y la pérdida correspondiente de la tierra cultivada en condiciones de barbecho continuo.

Por definición, C es igual a 1 en condiciones estándar de barbecho, a medida que se agrega cobertura superficial al suelo, el valor del factor C se acerca a cero (valor asociado a cuerpos de agua como lagos, ríos y estuarios además de nieve y glaciares). Un factor C de 0,15 significa que el 15% de la cantidad de erosión ocurrirá en comparación con las condiciones estandarizadas (Dumas, Printemps, 2010).

Mediante un post-procesamiento en QGIS versión 2.18, se asigna a cada clasificación valores de C con el objetivo de crear la capa de cobertura vegetal para la cuenca del río Maule. Estos valores no son fijos ni universales, la mayoría se basa en experiencias de laboratorio y terreno sin embargo la literatura converge en que valores estimados de C adquieren valores altos (cerca de 1) para la mayoría de las comunidades en el país, excepto para las coberturas de bosque nativo denso y bosques comerciales.

Los valores C para bosques nativos abiertos y semidensos son altos debido a que están principalmente sujetos a frecuente modificación asociado principalmente a la extracción de leña. Los bosques en su estado inalterado tienen valores C cercanos a 0.004, los valores C para plantaciones dependen de la edad de los árboles y de las prácticas de manejo forestal, esta situación resulta ser importante al generar el escenario pre-incendio dado que la zona de estudio (principalmente la franja ubicada en la cordillera de la costa) se caracteriza por albergar extensas plantaciones forestales, compuestas mayoritariamente por especies de pinos y eucaliptus.

Los valores que se asignaron al factor de cobertura vegetal C son finalmente extraídos del estudio “Water Erosion Prediction Using RUSLE in a GIS Framework, Central Chile” de Bonilla et al. (2010). La capa de cobertura vegetal mencionada en los párrafos anteriores constituye la base de clasificación para la obtención del producto satelital deseado.

Los valores que se utilizan para crear la capa de cobertura vegetal junto con la clasificación utilizada, recopilada de los antecedentes bibliográficos mencionados en el párrafo anterior, son presentados y tabulados en el Anexo A a).

4.1.1.4 Topografía zona de estudio, obtención del Factor LS.

El factor topográfico o “LS” en la metodología RUSLE entrega la relación que existe entre la longitud de ladera y su pendiente respectiva, ambas influyen de manera considerable en las tasas de erosión de suelo y también en la emisión de sedimentos de cuencas vertientes. Es posible identificar 3 importantes zonas según el modelo de escorrentía de Horton (1945); la parte alta de la ladera que no se ve afectada por fenómenos erosivos, una parte intermedia o zona activa donde ocurren los procesos de erosión más intensos y una parte baja de la ladera o zona de sedimentación donde las pendientes generalmente disminuyen.

Wischmeier y Smith (1978) definen, para efectos de aplicación de la metodología, la longitud de la ladera como la distancia que recorre la gota de escorrentía desde su formación, en la divisoria de aguas, hasta su incorporación al cauce o zona de sedimentación. Múltiples estudios han asignado diversos métodos para el cálculo del factor LS, basados en la metodología de Moore y Nieber (1989), los cuales son sintetizados por la ecuación (4.4), presentada a continuación:

$$LS = (0,4 + 1) * \left(\frac{SGC}{22.13}\right)^{0.4} * \left(\frac{\sin S}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (4.4)$$

De la ecuación anterior, S es la pendiente en grados y SGC el tamaño de la celda de cada grilla que depende, a su vez, de la resolución del DEM que se esté utilizando. Al ser una ecuación que se debe aplicar sobre toda la zona de estudio, se hace necesario el análisis computacional realizado por el software dedicado SAGA GIS, el cual tiene como únicos inputs el modelo de elevación digital y el método con el que se desea el cálculo del factor final

4.1.1.5 Erodabilidad de suelo, Factor K.

La erodabilidad es un índice capaz de cuantificar la vulnerabilidad o susceptibilidad a erosión según las propiedades intrínsecas del suelo, a mayor índice de erodabilidad mayor es el porcentaje de erosión (Mattos, 1999). Para la obtención de dicho factor se hace necesario en primera instancia individualizar los componentes del suelo, es decir porcentaje de arenas, porcentaje de finos, cantidad de materia orgánica disponible, permeabilidad, entre otros.

El valor de K viene a reflejar la erodabilidad de un determinado suelo o la tasa de erosión respecto a una parcela estándar de 22 metros de longitud y 9% de pendiente (Mitchell y Bubenzer, 1980). El primer paso es obtener en formato ráster los porcentajes de arena, limo y arcilla de la zona. Estos archivos se obtienen del sitio web “SoilGrids” con una resolución espacial de 200 metros y son procesados en las plataformas SAGA-GIS y en QGIS 2.18.

Posteriormente se obtienen las clases texturales de suelo de la región en estudio mediante la herramienta “Soil Texture Classification”. Las texturas se denominaron según la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). El valor de erodabilidad se asigna basado en la clasificación señalada por Stewart et al. (1975) junto con datos recopilados de la memoria “Estimación de la erosión hídrica en zona semiárida del norte chileno mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE): El caso de Punitaqui, IV Región de Coquimbo” (Escobar, 2019).

Los valores que se utilizan para crear la capa de erodabilidad junto con la clasificación de suelos recopilada de los antecedentes bibliográficos mencionados en el párrafo anterior, son presentados y tabulados en el Anexo B b).

4.1.1.5 Prácticas de Conservación de Suelo, Factor P.

El factor P es la componente de la metodología RUSLE encargada de recopilar antecedentes respecto a la práctica de conservación del suelo en estudio. Los rangos del factor P van entre el 0 y el 1, siendo el valor 0 el caso en que las medidas aplicadas confieren una buena resistencia a la erosión mientras que un factor 1 establece la no aplicación de medidas de conservación.

Para efectos prácticos del estudio, no se considerarán prácticas de conservación en el suelo afectado por el incendio forestal ya que con esto se podrá dimensionar los efectos erosivos netos que genera la afección de la capa de cobertura vegetal, adoptando finalmente $P=1$.

Se comenta en la sección de discusión el efecto que puede llegar a tener contemplar la aplicación de prácticas de recuperación posterior al evento incendiario, con el propósito de reducir las consecuencias adversas de su ocurrencia.

4.1.2 Generación de escenarios pre y post incendio.

Para la generación de escenarios pre y post incendio, se hace necesario individualizar y caracterizar los principales factores que son alterados con el propósito de bosquejar un contexto que simule lo ocurrido. Dicho lo anterior y en base a una extensa revisión bibliográfica, se llega a la conclusión que ninguna capa sufre cambios significativos que se traduzcan en modificaciones de sus condiciones naturales, salvo la capa C que contiene las componentes de cobertura vegetal de la zona, directamente alteradas por la acción del fuego. Se tiene conocimiento que la capa de erodabilidad posee un factor de contenido orgánico que permite el cálculo de este parámetro y que, dado un contexto de incendio, podría verse afectada sin embargo Bonilla et al. (2012) en su artículo "*Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile*" señala dentro de sus conclusiones la no correlación entre el factor K y el contenido de materia orgánica en estudios desarrollados en la zona centro-sur de Chile, además de una invariabilidad en el valor promedio de erodabilidad de suelos agrupados según el contenido de materia orgánica.

Se establece según lo señalado anteriormente que, para efectos de este estudio, sólo la capa del factor C variará en un escenario pre y post incendio. Las variaciones aplicadas se basarán en la lectura del informe “Hydrologic Analyses of Post-Wildfire Conditions” instaurando nuevos valores en la capa de factor C, modificada para zonas que fueron afectadas bajo cierto grado de severidad en la cuenca, los cuales son presentados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Variación del valor de factor C según el índice de severidad de incendio.

dNBR (BARC4)	Severidad de incendio	Valor factor C adoptado	Fuente de referencia
1	Nula	Inalterado	-
1.75	Baja	1.03	Larsen et al. (2007)
2.5	Media	2.25	
3.25	Media	2.25	
4	Alta	3.75	Estimación Informe EE. UU

4.2 Determinación de variaciones en escorrentía.

Uno de los fenómenos que es posible observar en suelos afectados por incendios de diversa severidad corresponde a la hidrofobicidad. La ocurrencia de esta fenómeno afecta fundamentalmente los procesos hidrológicos a escala de cuenca, siendo uno de los principales la infiltración.

La disminución de infiltración en suelos con características hidrofóbicas (o que han adoptado esta cualidad luego de ser quemados) provoca un aumento en la escorrentía superficial ante eventos de precipitación (Figura 4.6).

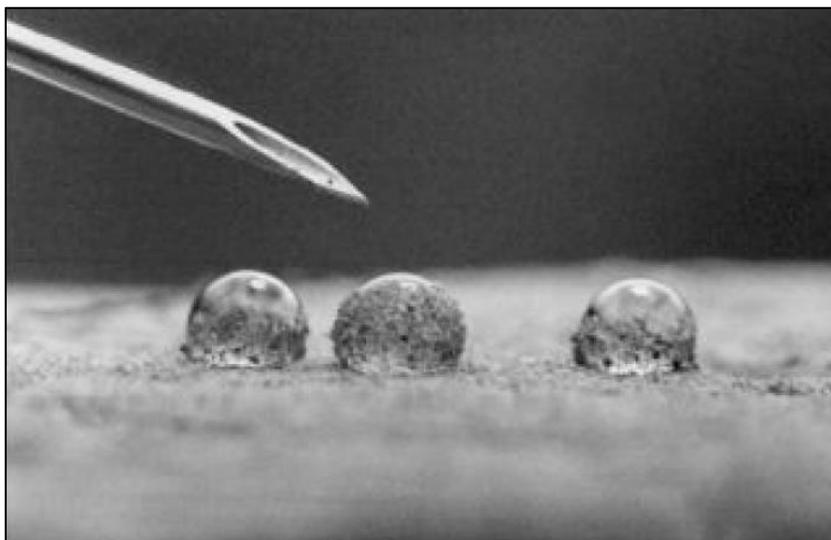


Figura 4.6: Resistencia de gotas de agua a infiltración en suelo hidrofóbico (Doerr et al. 2000).

Con el objetivo de representar dicha condición hidrofóbica en el suelo quemado es que se procede a utilizar las relaciones que establece el método de la curva número, debido a que dicha metodología permite caracterizar condiciones de suelo, específicamente sus capacidades de infiltración. El informe *Hydrologic Analyses of Post Wildfire Conditions* establece valores estimados de Curva Número para suelos quemados bajo diferentes niveles de severidad de incendio, aspecto útil para el cumplimiento de los objetivos de la investigación basado en la extrapolación de información recopilada de otros países que han sufrido los efectos de incendios forestales.

La metodología de la curva número (Figura 4.7) se basó en obtener variaciones en los caudales de subcuencas quemadas que pertenecen a la cuenca del río Maule. Dicho lo anterior y apoyados por software HEC-HMS de precipitación/escorrentía, se obtuvo variaciones en los caudales y por ende en las alturas de escurrimiento para la determinación de la diferencia de gasto sólido de fondo respecto a un escenario base.

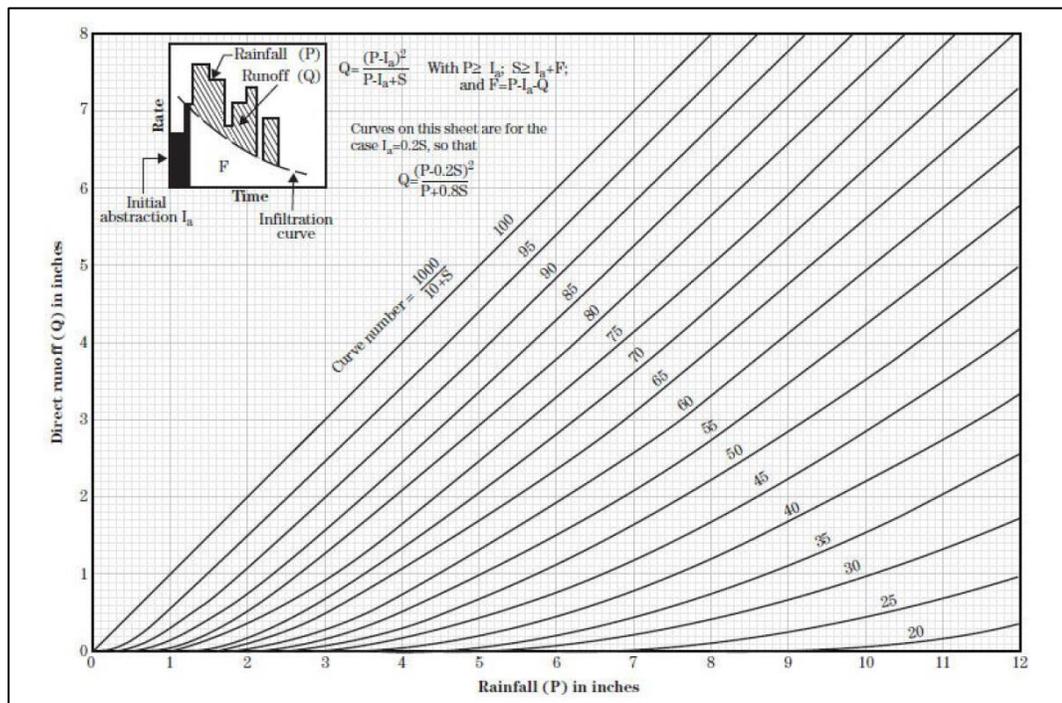


Figura 4.7: Representación Gráfica método de la Curva Número (NRCS., 2009).

Las ecuaciones (4.5) y (4.6) detallan el método de la curva número:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S} \quad (4.5)$$

$$S = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4.6)$$

Donde:

P_e [mm] = Precipitación que se convierte en escorrentía efectiva

P [mm] = Precipitación líquida total

S [mm] = Parámetro extraído de la curva número

CN [-] = Valor Curva número

4.2.1 Clasificación según tipo de suelo

El método de la curva número, elaborado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS), es la metodología empleada para plasmar el efecto hidrofóbico del incendio sobre el suelo, reduciendo la capacidad filtrante en este último. El método de la curva número requiere, para su aplicación, la caracterización de la zona según tipo y uso de suelo, con el propósito de establecer ambas categorías y para efectos de este estudio, se realizó un breve análisis de las zonas de interés que se desea clasificar basado en la concentración de sectores afectados por el incendio del año 2017, según el dNBR.

Recordando que el método RUSLE incorpora dentro de sus capas el factor de erodabilidad (factor k) relacionada a la tipología de suelo según sus componentes, es posible caracterizar este último su capacidad de infiltración. Para la cuenca en estudio, se evidencia un predominio de suelos Franco Arcillosos y Franco Limosos (ver Figura 4.8)

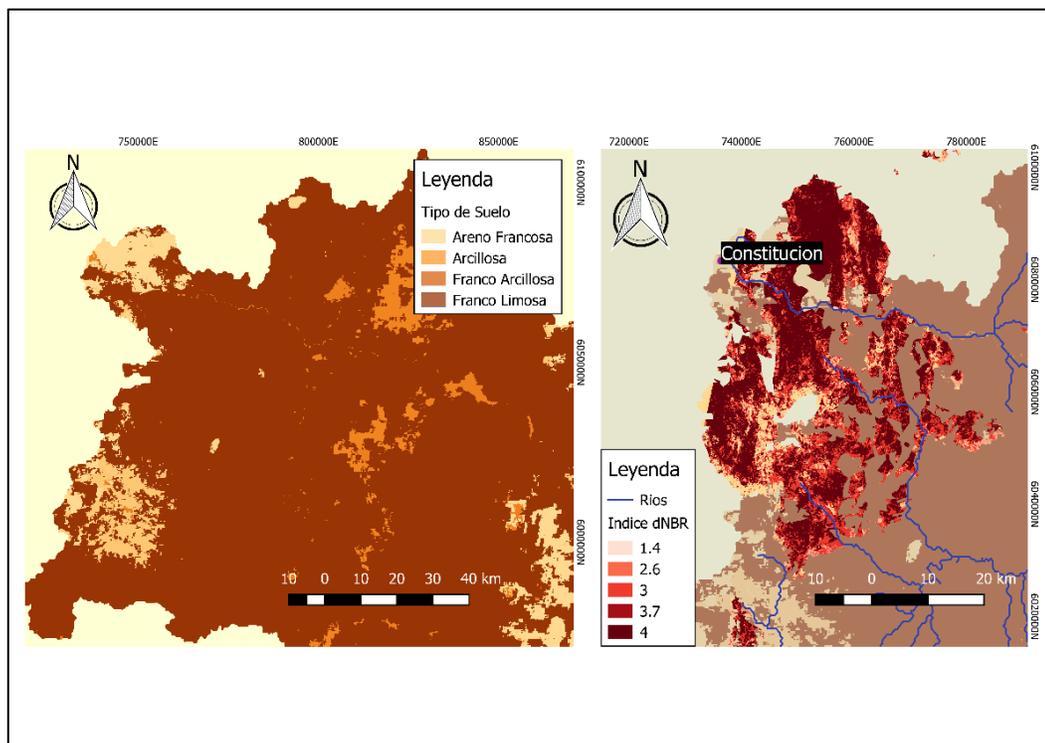


Figura 4.8: Visualización de la distribución espacial de tipo de suelo e índice dNBR para sectores cercanos a la ciudad de Constitución.

La Tabla 4.4 clasifica el tipo de suelo según el grupo hidrológico establecido por la SCS (Bradbury et al. 2000), para términos de esta investigación se adoptará un tipo de suelo B.

Tabla 4.4: Clasificación de suelo según grupo hidrológico y textura de suelos.

Grupo Hidrológico de Suelo	Infiltración condición húmeda	Capacidad de Infiltración	Textura
A	Rápida	> 76 mm/h	Arenosa Arenosa-limosa Franca
B	Moderada	76-38 mm/h	Franco-Arcillosa-Arenosa Franco-limosa
C	Lenta	36-13 mm/h	Franco-arcillo-limosa, Arcillo-Arenosa, Arcillo-Arenosa
D	Muy lenta	< 13 mm/h	Arcillosa

4.2.2 Clasificación según uso de Suelo

Como se señala en la sección anterior, para poder emplear la metodología de la curva número se hace necesario caracterizar también el uso de suelo en la zona de estudio. La cuenca del río Maule abarca una extensa superficie de nuestro país, siendo el uso de suelo diferente en cada sector que la compone, para efectos de esta memoria se estableció un uso de suelo representativo de los sectores que fueron afectados según el dNBR por el incendio forestal del año 2017, siendo estos últimos individualizados en la Figura 4.8.

Gracias a los estudios de uso de suelo realizados por CONAF y la Universidad Austral de Chile en el año 2010, es posible apreciar que el área en que se encuentran las zonas quemadas corresponde principalmente a plantaciones forestales en diferente estado de desarrollo (Figura 4.9).

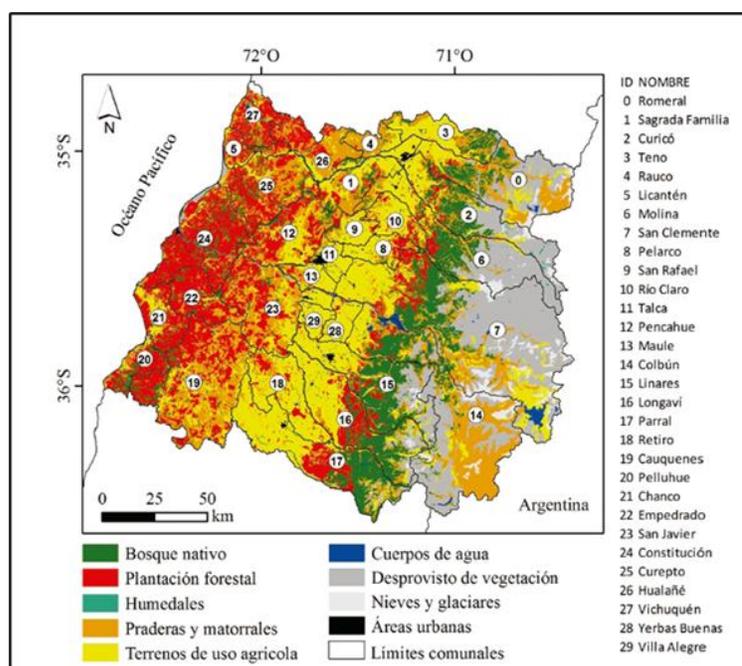


Figura 4.9: Uso de suelo en la región del Maule (CONAF-UACH, 2010).

Cabe destacar que la tendencia en el uso de uso de suelo en la región para cultivos forestales (mayoritariamente Pino Radiata) se ha mantenido al alza según lo presentado por el catastro de CONAF (Figura 4.10). Esta tendencia permite ratificar la decisión de elegir como representativo de la zona un uso de suelo destinado a plantación de pinos/eucaliptos.

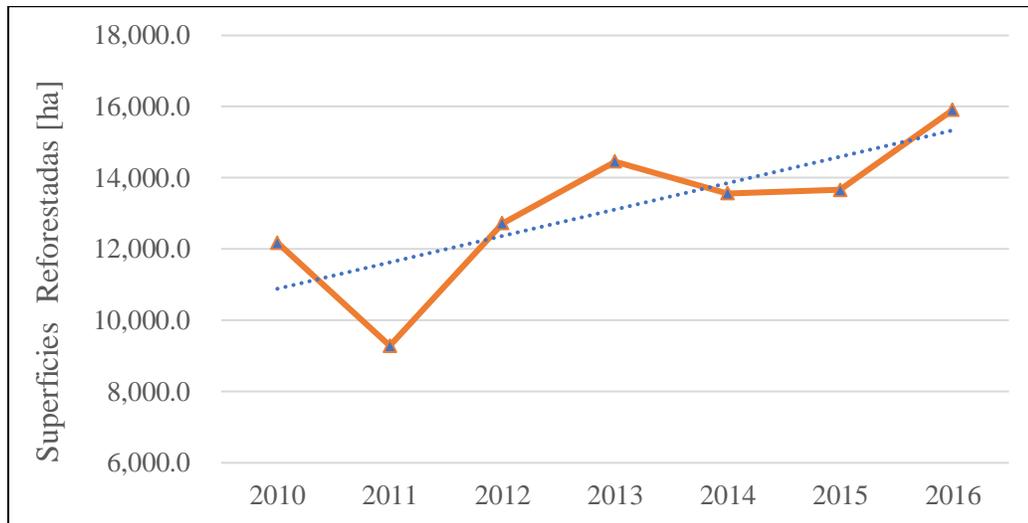


Figura 4.10: Superficies reforestadas pertenecientes a la especie pino radiata, desde el año 2010 a 2016 en la Región del Maule. (CONAF, 2017).

Se clasifica el uso de suelo de acuerdo con lo señalado anteriormente y conforme a los valores estipulado por la SCS (ver Tabla 4.5) en ambientes áridos y semiáridos. Para efectos prácticos, se asume que las plantaciones forestales en la zona corresponden principalmente a coníferas.

Tabla 4.5: Clasificación según uso de suelo propuesto por la SCS para diferentes grupos hidrológicos.

Descripción Cobertura		Curva número según grupos hidrológico			
Tipo cobertura	Condición Hidrológica**	A***	B	C	D
Herbáceo; mezcla de pastizal, malezas y arbustos de bajo crecimiento	Pobre	-	80	87	93
	Media	-	71	81	89
	Buena	-	62	74	85
Árboles de montaña; roble, álamo, arce y arbustos de crecimiento intermedio.	Pobre	-	66	74	79
	Media	-	48	57	63
	Buena	-	30	41	48
Pinos, juníferos.	Pobre	-	75	85	89
	Media	-	58	73	80
	Buena	-	41	61	71
Sotobosque de hierba.	Pobre	-	67	80	85
	Media	-	51	63	70
	Buena	-	35	47	55
Arbustos característicos de desierto;	Pobre	63	77	85	88
	Media	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

*: Condición Promedio de escorrentía: $I_a = 0.2 S$

** : Condición de cobertura pobre (<30%), media (30-70%), buena (>70%)

***: Curvas Número del grupo A fueron desarrolladas sólo en ambientes desérticos

Se obtiene un valor de curva número igual a 58, correspondiente a una cobertura parcial (30-70%) de suelo compuesta por pinos en ambientes aridos/semiaridos y bajo la clasificación hidrológica de suelos tipo B.

El procedimiento anterior significa la construcción del escenario base previo al incendio, caracterizando el suelo que posteriormente sería afectado por él y su respuesta hidrológica ante un evento de precipitación representativo de la zona. En la sección de resultados se presenta el escenario afectado, construido en base a la extrapolación de valores de curva número desde el informe “*Hydrologic Analyses of Post Wildfire Conditions*” creado por el USDA en suelos con similares características hidrológicas expuestos a grados de severidad de incendio análogos al evento del año 2017, que afectó la cuenca del río Maule. Lo anterior tiene como objetivo recrear la tendencia hidrofóbica de suelos sometidos a una severidad de incendio alta.

4.3 Metodología de análisis de resultados

El objetivo general de esta memoria comprende la estimación de la variación tanto de gasto sólido suspendido como de fondo, asociado a los efectos del incendio forestal, ocurrido el año 2017 en la región del Maule. Con el objetivo de generar escenarios que caractericen la zona de estudio antes del incendio y después del incendio es que se han implementado las metodologías en las secciones anteriores.

Debido a la disponibilidad de información sedimentométrica, destacando el tipo de registro que se lleva a cabo en la zona, es que se hace necesario generar un nexo que permita calcular el rendimiento de la metodología conjunta RISLE/SDR con lo medido por las estaciones disponibles. Como se establece en el numeral 3.2.2 del presente informe, las mediciones de GSS rutinario diario llevadas a cabo en la estación Loncomilla en las Brisas para una ventana temporal que va desde el año 1986 y 2016 serán las utilizadas para calcular dicho rendimiento, considerando claramente, que se aplicará al área de la cuenca correspondiente (monitoreada por la estación señalada).

Teniendo el valor anual de gasto sólido suspendido rutinario entregado por la estación sedimentométrica, se procede a establecer una comparación porcentual entre un escenario base (asociado a este valor anual registrado) y el escenario que alberga la obtención del sedimento transportado/depositado calculado por el modelo empírico conjunto RUSLE/SDR para la situación pre-incendio. La estrategia anterior tiene como fin evaluar la estimación del método empírico RUSLE/SDR versus los valores de GSS rutinario promedio anual medidos por la estación Loncomilla en las Brisas.

Posterior a este procedimiento y una vez obtenido el porcentaje de sobrestimación o subestimación del producto calculado por RUSLE/SDR, se extendió el proceso de obtención de GSS para la Cuenca río Maule en los escenarios pre y post incendio, estableciendo la diferencia porcentual de ambos momentos como la variación de gasto sólido suspendido atribuible a los efectos del incendio del año 2017.

Para la estimación de las variaciones de gasto sólido de fondo, se aplicará la metodología de curva número, modificando el parámetro de escorrentía del suelo por aquellos valores extraídos en zonas afectadas por incendios propuestas en el informe “*Hydrologic Analyses of Post Wildfire Conditions*”.

La aplicación del método de la curva número se sustenta en la creación de dos escenarios; uno base, sin alteración por efecto del fuego, obtenido bajo condiciones de tipo/uso de suelo pre-incendio y otro perturbado, intentando simular el efecto de hidrofobicidad en el suelo afectado. Los valores de curva número para el segundo escenario son extrapolados según lo establecido por la literatura correspondiente y sustentados gracias a la investigación llevada a cabo por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA).

Los resultados de dicha modelación, realizada en el programa HEC-HMS, permiten generar escorrentía aportante (alterada respecto a un escenario base en que la tasa de infiltración del suelo no se ve afectada) proveniente de subcuencas afectas. Su incorporación al cauce principal altera la altura de escurrimiento de la sección correspondiente, pudiendo así obtener una variación estimativa del GSF.

Los parámetros requeridos para el cálculo del gasto sólido de fondo como lo son por ejemplo la pendiente del cauce y diámetro característico de sedimento del lecho de río son extraídos del informe “*Metodología para el análisis físico de estuarios. Aplicación a Lebu, Tirúa y Constitución para restablecer la pesca artesanal*” que recopila datos sedimentométricos en la localidad de Constitución, gracias a una campaña realizada por el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) en el año 2013.

Capítulo 5: Resultados

5.1 Potencial erosivo RUSLE y determinación de GSS.

Siguiendo las metodologías presentadas en las secciones anteriores, se obtuvo el primer producto necesario para la estimación de GSS, el potencial erosivo anual calculado bajo la metodología RUSLE para la cuenca del río Loncomilla en las Brisas, para un escenario pre-incendio y post-incendio (Figura 5.1 y Figura 5.2 respectivamente).

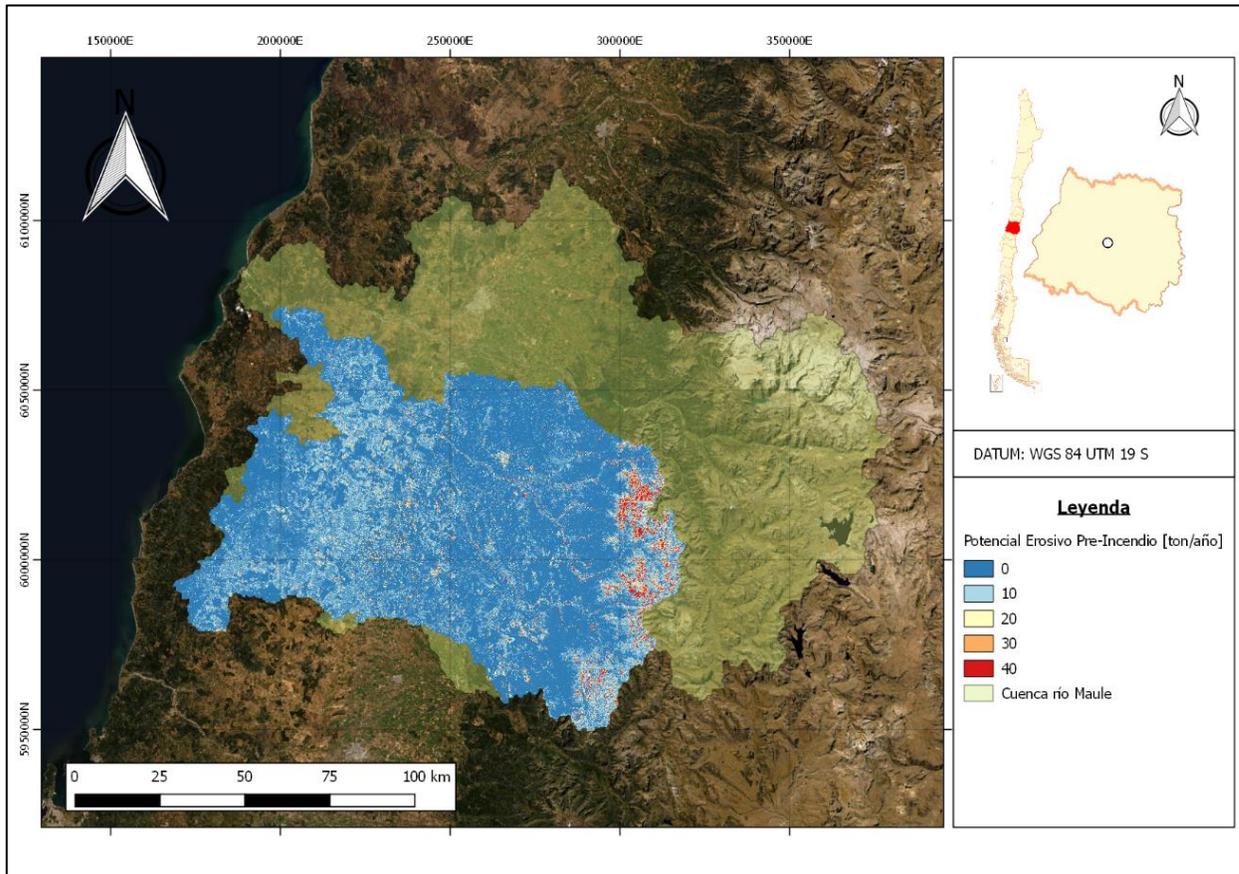


Figura 5.1: Potencial erosivo anual cuenca Loncomilla en las Brisas para escenario previo al incendio de 2017.

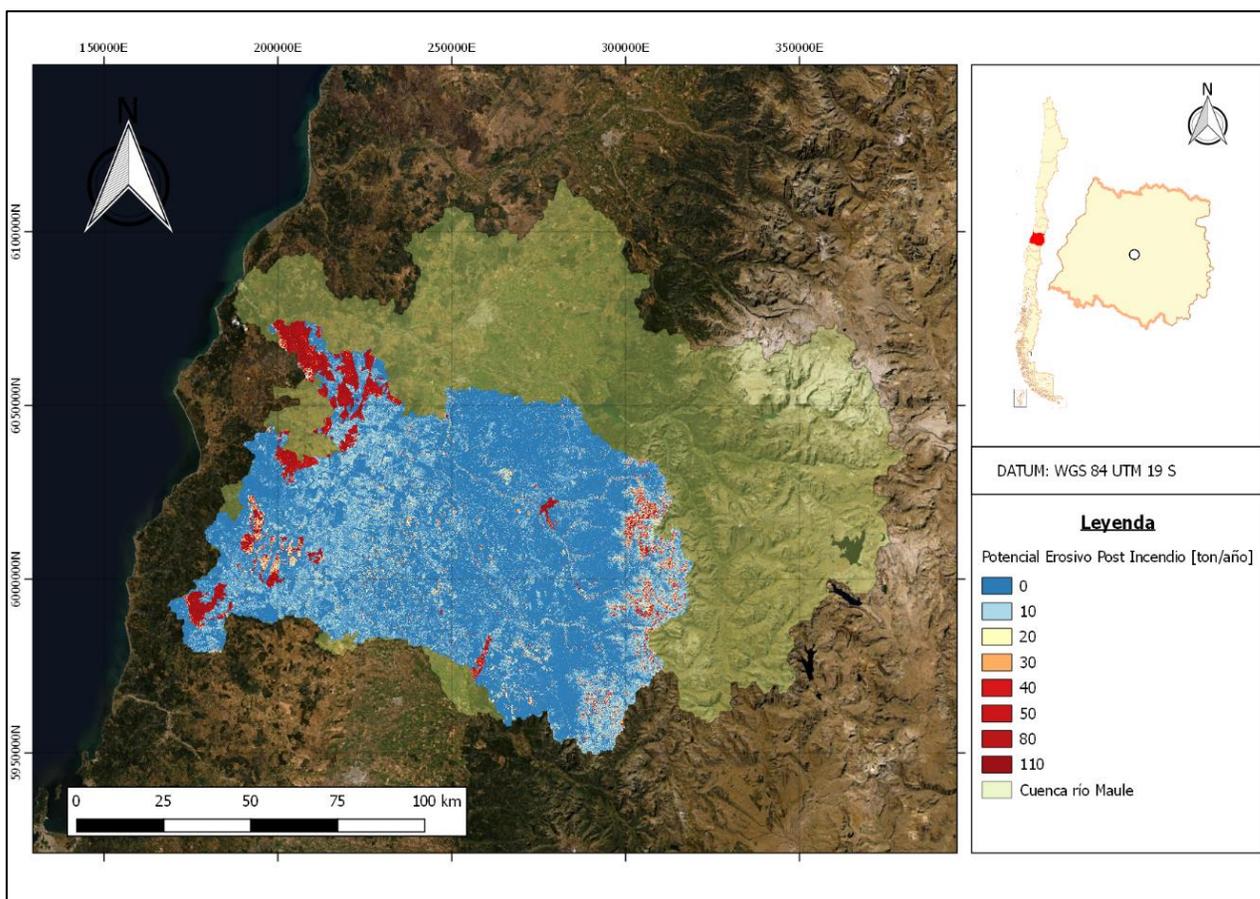


Figura 5.2: Potencial erosivo anual cuenca Loncomilla en las Brisas para escenario posterior al incendio de 2017.

Las figuras presentadas anteriormente muestran el gran cambio en los valores de potencial erosivo asociado al impacto de severidad de incendio catastrado el año 2017 en cada una de las cuencas, las zonas quemadas en dicho evento pueden apreciarse con tonalidades rojizas.

Posterior a la obtención de esta capa, se completa la utilización del método conjunto propuesto RUSLE/SDR mediante la aplicación de este último índice (en base al área de cada cuenca), obteniendo así el GSS para la cuenca analizada. El área de la cuenca analizada, río Loncomilla en las Brisas, es igual a 9924 km². Los resultados entregados por cada uno de los autores para este índice son presentados por la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Cálculo de índice SDR para las cuencas en estudio según diversos autores.

Autor	Valor SDR	
	Loncomilla en las Brisas	Río Maule
Vanoni	0.15	0.14
USDA 1972	0.19	0.17
Renfro	1.63	1.47
USDA 2002	0.19	0.17

De la tabla anterior y tal como se señaló en las secciones anteriores de este informe, se procede a utilizar el valor SDR propuesto por la USDA (2002).

Con el objetivo de comparar el rendimiento del modelo conjunto RUSLE/SDR respecto a las mediciones de GSS disponible en la zona, se analizan los datos correspondientes al muestreo rutinario diario disponibles en la plataforma de la DGA para la estación Río Loncomilla en las Brisas. Se obtiene el promedio anual de GSS para el periodo anterior al incendio forestal del año 2017, presentado en la Figura 5.3.

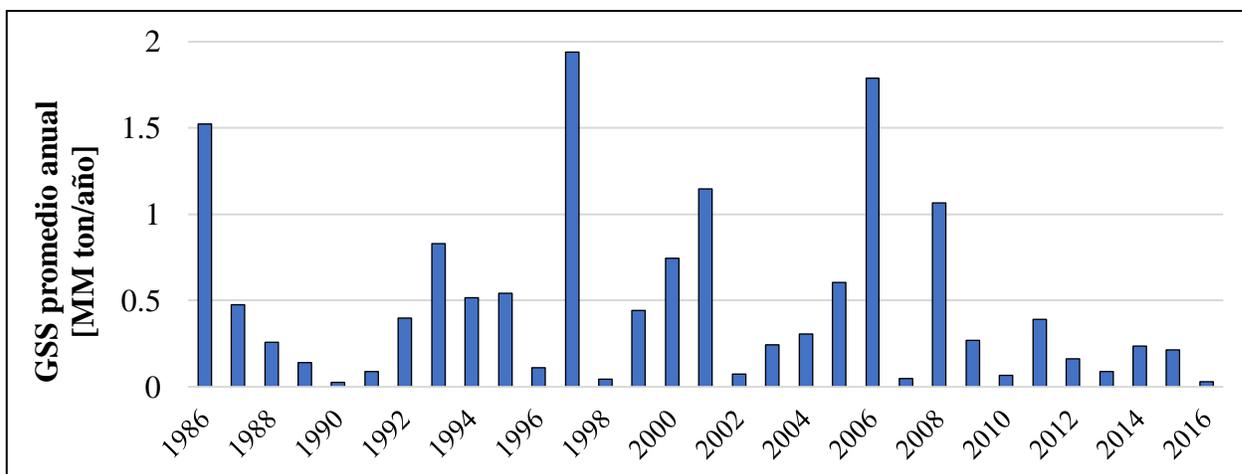


Figura 5.3: Registro de gasto sólido rutinario anual en estación Loncomilla en las Brisas para el periodo 1986-2016.

Los resultados de la aplicación del modelo RUSLE/SDR en la cuenca Río Loncomilla en las Brisas señalan que el modelo conjunto sobrestima el gasto sólido suspendido anual promedio medido por la estación mismo nombre para un registro entre los años 1986-2016 en un 11.8% (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Comparación entre valores de GSS anual medido y simulado, cuenca Loncomilla en las Brisas.

Cuenca	RUSLE /SDR Pre-incendio [ton/año]	Promedio GSS anual periodo 1986-2016 [ton/año]	Diferencia
Loncomilla en las Brisas	542149.0	478010.8	11.8%

Se debe tener en consideración la hipótesis inicial planteada donde se asume que lo obtenido mediante el modelo RUSLE/SDR, compone en su totalidad el GSS disponible a ser transportado por el río Maule. Lo anterior constituye un supuesto complejo pero razonable bajo dos puntos de vista: el primero y más directo, es el motivo por el que se ha elegido incluir el índice de aporte sedimentario SDR en este estudio y la naturaleza con que analiza las relaciones de aporte sedimentario que constituye el gasto sólido suspendido, considerando sedimento depositado y transportado dentro de cada cuenca. Por otro lado, y como segundo punto importante, se ha analizado la clase de suelo que presenta la cuenca del río Maule, mayormente compuesta por suelos finos franco-arcillosos y franco-limosos (Figura 4.8), siendo estas partículas de pequeño tamaño granulométrico en comparación a arenas o gravas.

El porcentaje de sobrestimación del modelo RUSLE/SDR igual a 11.8%, se considera admisible y válido en cuanto alcances estimativos del estudio desarrollado. Se procede a extrapolar la metodología del modelo RUSLE/SDR para la cuenca completa del río Maule en un escenario posterior al incendio del año 2017.

A diferencia de la cuenca Loncomilla en las Brisas, la cuenca del río Maule engloba la totalidad de área afectada catastrada por el Instituto Nacional de Hidráulica, mediante el índice BARC4 para la región del Maule. Con ello y habiendo expuesto las condiciones de análisis en los párrafos anteriores, la Figura 5.4 y la Figura 5.5 establecen el potencial erosivo anual obtenido mediante el método RUSLE.

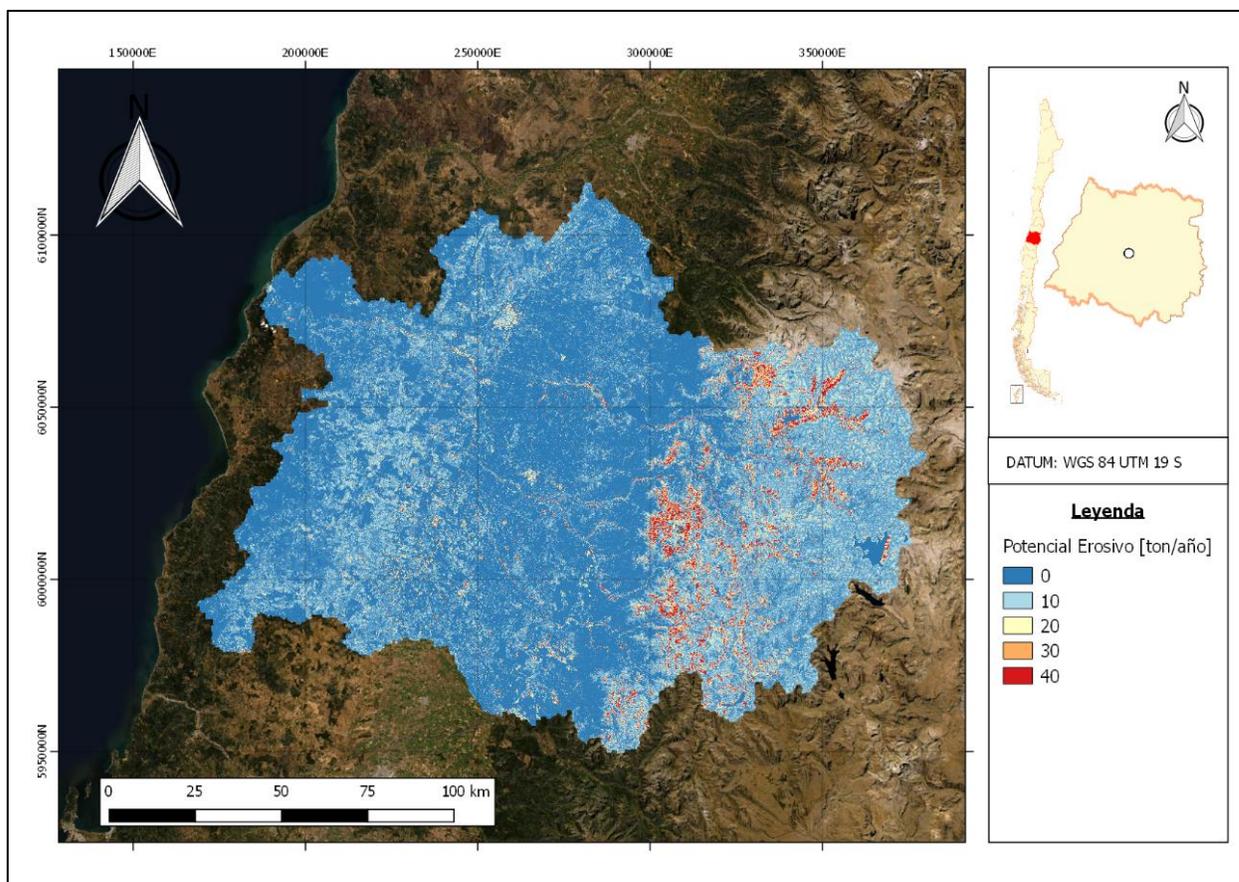


Figura 5.4: Distribución espacial del potencial erosivo anual en la cuenca del río Maule previa al incendio.

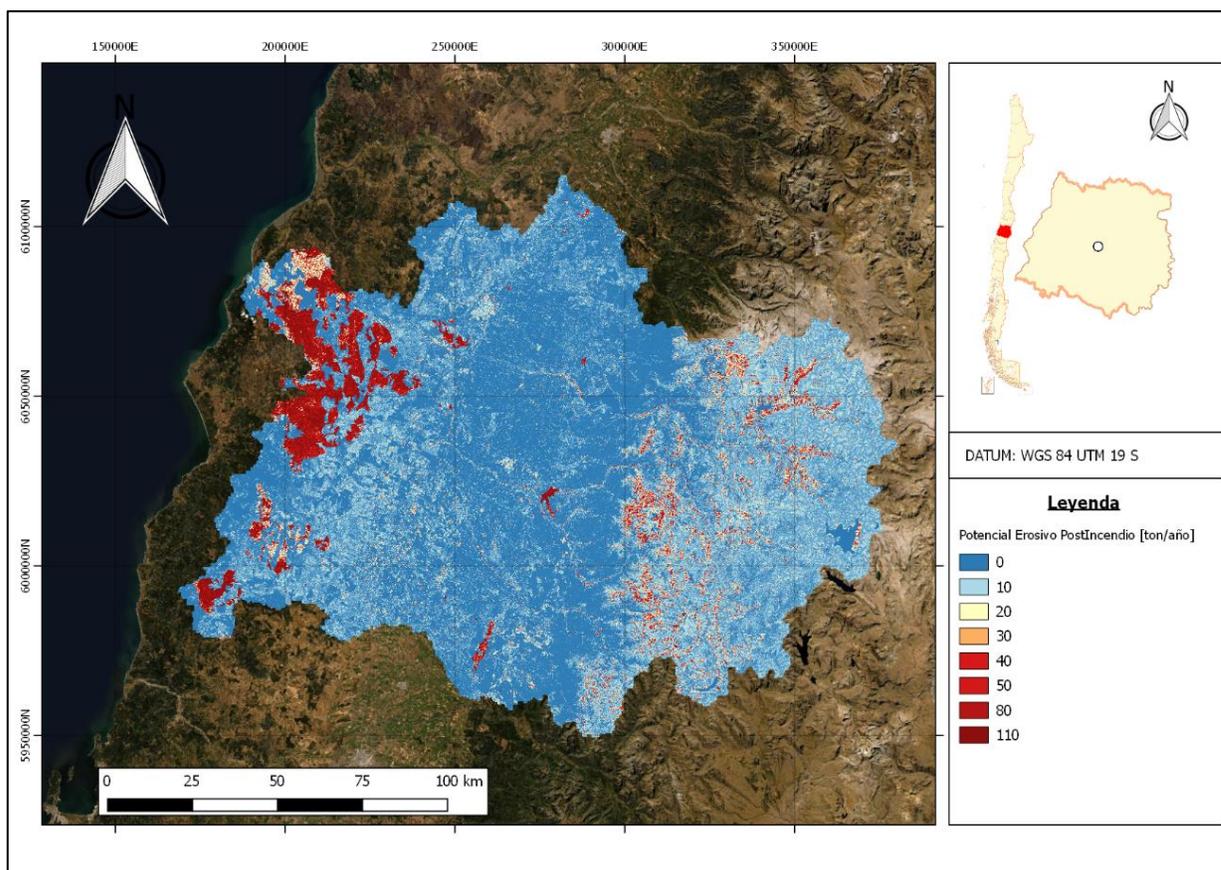


Figura 5.5: Distribución espacial del potencial erosivo anual en la cuenca del río Maule posterior al incendio.

Aplicando el índice de aporte sedimentario SDR respectivo según el área de la cuenca del río Maule, se completa la aplicación de la metodología conjunta RUSLE/SDR con lo que se obtiene finalmente la estimación porcentual de GSS a raíz de los efectos atribuibles al incendio en estudio en la cuenca del río Maule (Tabla 5.3)

Tabla 5.3: Estimación de la variación de gasto sólido suspendido a raíz del efecto del incendio forestal de 2017 para cuenca del Río Maule

Cuenca	RUSLE /SDR Pre [Ton/año]	RUSLE/SDR Post [Ton/año]	Diferencia
Río Maule	1153357.0	3077372.0	167%

El análisis para la cuenca del río Maule permite establecer que entre un escenario base pre-incendio y un escenario post-incendio, en que han sido tomado modificados sustancialmente los factores relacionados con la cobertura vegetal de suelo, el modelo integrado RUSLE/SDR entrega una tasa de aumento de sedimento transportado/depositado igual a 167% respecto al valor promedio anual en el periodo entre 1986 - 2016.

Tal y como se mencionó anteriormente, este porcentaje obtenido significa en términos de resultados, el aumento del gasto sólido suspendido provocado por el cambio de las condiciones naturales de terreno y la acción erosiva de la lluvia sobre la superficie quemada.

5.2 Curva Número y obtención de GSF.

5.2.1 Parámetros para la modelación en HEC-HMS

5.2.1.1 Parámetros geomorfológicos

Uno de los grandes efectos que generan los incendios forestales es la adopción de un comportamiento hidrofóbico de los suelos quemados. Este efecto se traduce básicamente en una pérdida en la capacidad de filtración hacia el subsuelo.

Con el objetivo de recrear esta situación es que se utilizó una simulación básica precipitación escorrentía en el modelo HEC-HMS para una subcuenca ubicada en un sector afectado, según el índice dNBR y BARC4, por el incendio del año 2017.

La Figura 5.6 presenta la ubicación de esta subcuenca experimental, donde además se añaden las isoyetas de precipitación máxima diaria para 24, 48 y 72 horas con un periodo de retorno de 10 años (DGA, 1991) para la zona de estudio:

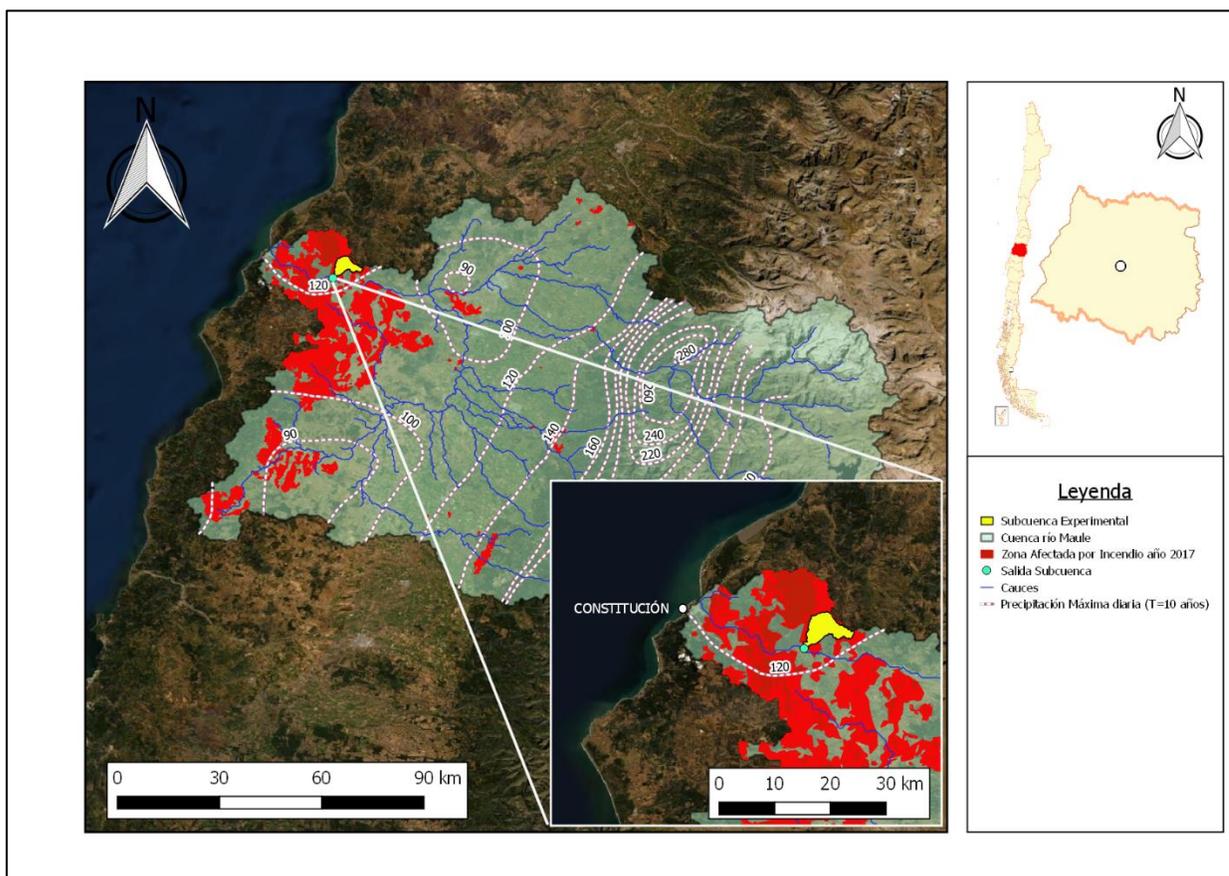


Figura 5.6: Isoyetas de precipitación máxima diarias para 24, 48 y 72 horas, con periodo de retorno de 10 años, distribuidas en la cuenca del río Maule (DGA, 1991).

Los parámetros geomorfológicos para la cuenca experimental, necesarios para realizar la simulación en el modelo precipitación escorrentía HEC-HMS versión 4.7.1, se presentan en la Tabla 5.4:

Tabla 5.4: Parámetros geomorfológicos de cuenca experimental.

Parámetros de Cuenca	Valor	Unidad
Área	36.6	[km ²]
H máx	504.7	[m.s.n.m]
H min	146.9	[m.s.n.m]
Pendiente media	0.02	[m/m]
Largo tramo más largo	14.9	[km]

5.2.1.2 Escenario Base

Como se mencionó en la sección de metodologías, el valor de CN para una situación previa al incendio se obtiene clasificando la zona como suelo tipo B, según criterio de infiltración de suelo hidrológico y cobertura (uso de suelo) tipificada como plantación forestal de pinos.

Dicho lo anterior, el valor de CN adoptado es 58 para la condición de suelo pre-incendio.

5.2.1.3 Escenario Alterado

Manteniendo la clasificación de grupo hidrológico de suelo tipo B dado que no se modifica la composición de este, se adopta un valor de CN igual a 95 en base a los estudios realizados en zonas afectadas por incendios forestales (Arizona y Nuevo México). Dichas áreas, al igual que los suelos quemados en la zona de estudio de esta investigación, presentan alta severidad de incendio. El valor adoptado también se sustenta en los resultados de estudios realizados por Canfield et al. (2005), donde se menciona que para modelar uno de los efectos de los incendios forestales en suelos quemados, el comportamiento hidrofóbico, existen 3 variaciones que pueden ser aplicadas; una es reducir la conductividad hidráulica, aumentar el área impermeable de la cuenca o incrementar el valor de CN por sobre 90, se procede a adoptar esta última opción según la elección de la metodología empleada.

Se calculan los tiempos de concentración característicos para la subcuenca escogida, presentados en la Tabla 5.5 para diferentes autores propuestos por el Manual de Carreteras Volumen N° 3 (MOP, 2020):

Tabla 5.5: Tiempos característicos calculados según autores establecidos en Manual de Carreteras Volumen 3 (MOP, 2020).

Autor	Tc [min]
California	134.1
Normas Españolas	284.7
Giandotti	260.9
SCS (1975)	33.4
Promedio	178.2

Bajo un enfoque conservador, el tiempo de concentración a utilizar corresponde al promedio de los valores obtenidos por los diferentes autores e igual a 178.2 minutos. El valor del tiempo de retardo adoptado es igual al 60% del tiempo de concentración calculado (USDA, 1984)

5.2.1.3 Precipitación de diseño

Tal como se menciona en las secciones anteriores, se utilizará el mapa de isoyetas de precipitaciones máximas diarias con periodo de retorno de 10 años (DGA, 1991) para el sector en que se ubica la cuenca experimental (Figura 5.7). Para la construcción de hietogramas, existen diversos métodos de desagregación temporal del monto de precipitación total registrado para ciertos periodos de retorno, dentro de los más utilizados se encuentra el método de Varas (Varas, 1985) y el método de desagregación de bloques alternados (Chow et al. 1994).

La aplicabilidad de ambos métodos para el diseño de un hietograma, proveniente de la desagregación del monto de precipitación diario establecido para el periodo de retorno, requiere de un análisis estadístico que sale de los alcances que contempla este informe. Dicho lo anterior y, con el objetivo de establecer un contexto temporal a la precipitación que se utiliza en el modelo precipitación-escorrentía, se propone la aplicación como input del siguiente hietograma de diseño:

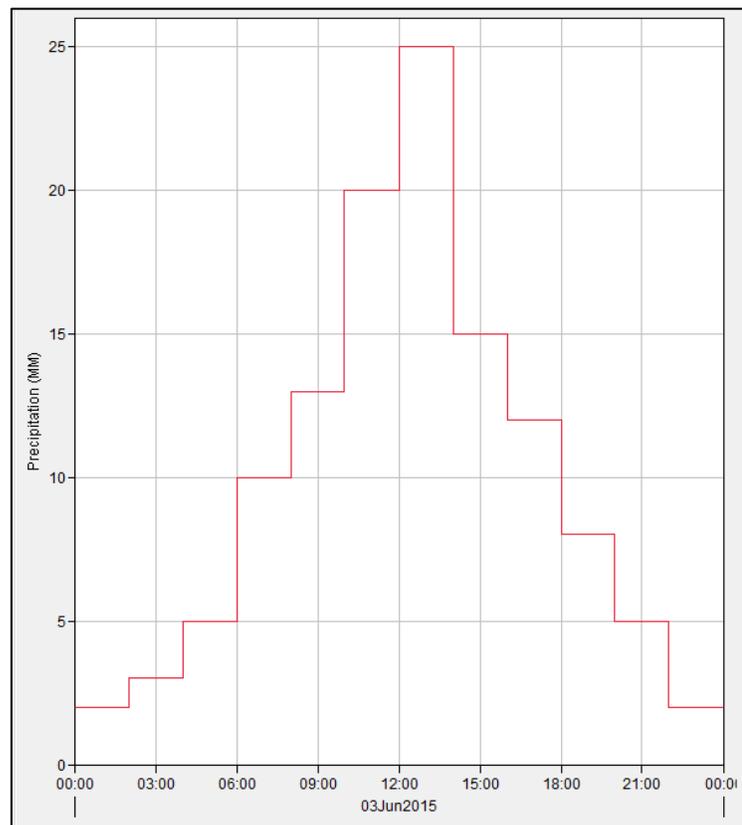


Figura 5.7: Hietograma en base a la desagregación del monto de precipitación máxima diaria con periodo de retorno de 10 años, igual a 120 mm.

Estableciendo las condiciones de entrada al modelo HEC-HMS para la simulación de escorrentía, se calculan los montos de esta última para los escenarios pre-incendio y post-incendio. Los resultados obtenidos son presentados en la Tabla 5.6 y en la Tabla 5.7 respectivamente.

Tabla 5.6: Valores de escorrentía superficial e infiltración, simulación para escenario base.

Project: Cuenca experimental Simulation Run: Run 1
Subbasin: SCS

Start of Run: 03jun.2015, 00:00 Basin Model: Cuenca experimental
End of Run: 04jun.2015, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

Date	Time	Precip (MM)	Loss (MM)	Excess (MM)	Direct Flow (M3/S)	Baseflow (M3/S)	Total Flow (M3/S)
03jun.2015	00:00				0,0	0,0	0,0
03jun.2015	03:00	3,50	3,50	0,00	0,0	0,0	0,0
03jun.2015	06:00	6,50	6,50	0,00	0,0	0,0	0,0
03jun.2015	09:00	16,50	16,50	0,00	0,0	0,0	0,0
03jun.2015	12:00	26,50	25,19	1,31	2,9	0,0	2,9
03jun.2015	15:00	32,50	23,61	8,89	21,1	0,0	21,1
03jun.2015	18:00	19,50	11,25	8,25	26,3	0,0	26,3
03jun.2015	21:00	10,50	5,36	5,14	20,3	0,0	20,3
04jun.2015	00:00	4,50	2,17	2,33	11,5	0,0	11,5

Tabla 5.7: Valores de escorrentía superficial e infiltración, simulación para escenario alterado.

Project: Cuenca experimental Simulation Run: Run 1
Subbasin: SCS

Start of Run: 03jun.2015, 00:00 Basin Model: Cuenca experimental
End of Run: 04jun.2015, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
Compute Time: 25oct.2021, 21:36:27 Control Specifications: Control 1

Date	Time	Precip (MM)	Loss (MM)	Excess (MM)	Direct Flow (M3/S)	Baseflow (M3/S)	Total Flow (M3/S)
03jun.2015	00:00				0,0	0,0	0,0
03jun.2015	03:00	3,50	3,45	0,05	0,1	0,0	0,1
03jun.2015	06:00	6,50	3,95	2,55	5,8	0,0	5,8
03jun.2015	09:00	16,50	3,83	12,67	30,6	0,0	30,6
03jun.2015	12:00	26,50	2,00	24,50	66,2	0,0	66,2
03jun.2015	15:00	32,50	0,95	31,55	94,0	0,0	94,0
03jun.2015	18:00	19,50	0,31	19,19	75,0	0,0	75,0
03jun.2015	21:00	10,50	0,13	10,37	46,7	0,0	46,7
04jun.2015	00:00	4,50	0,05	4,45	24,0	0,0	24,0

La modelación también permite visualizar de manera gráfica los resultados de escorrentía (barras azules) e infiltración (barras rojas) para el escenario base y para el escenario modificado (Figura 5.8 y Figura 5.9 respectivamente):

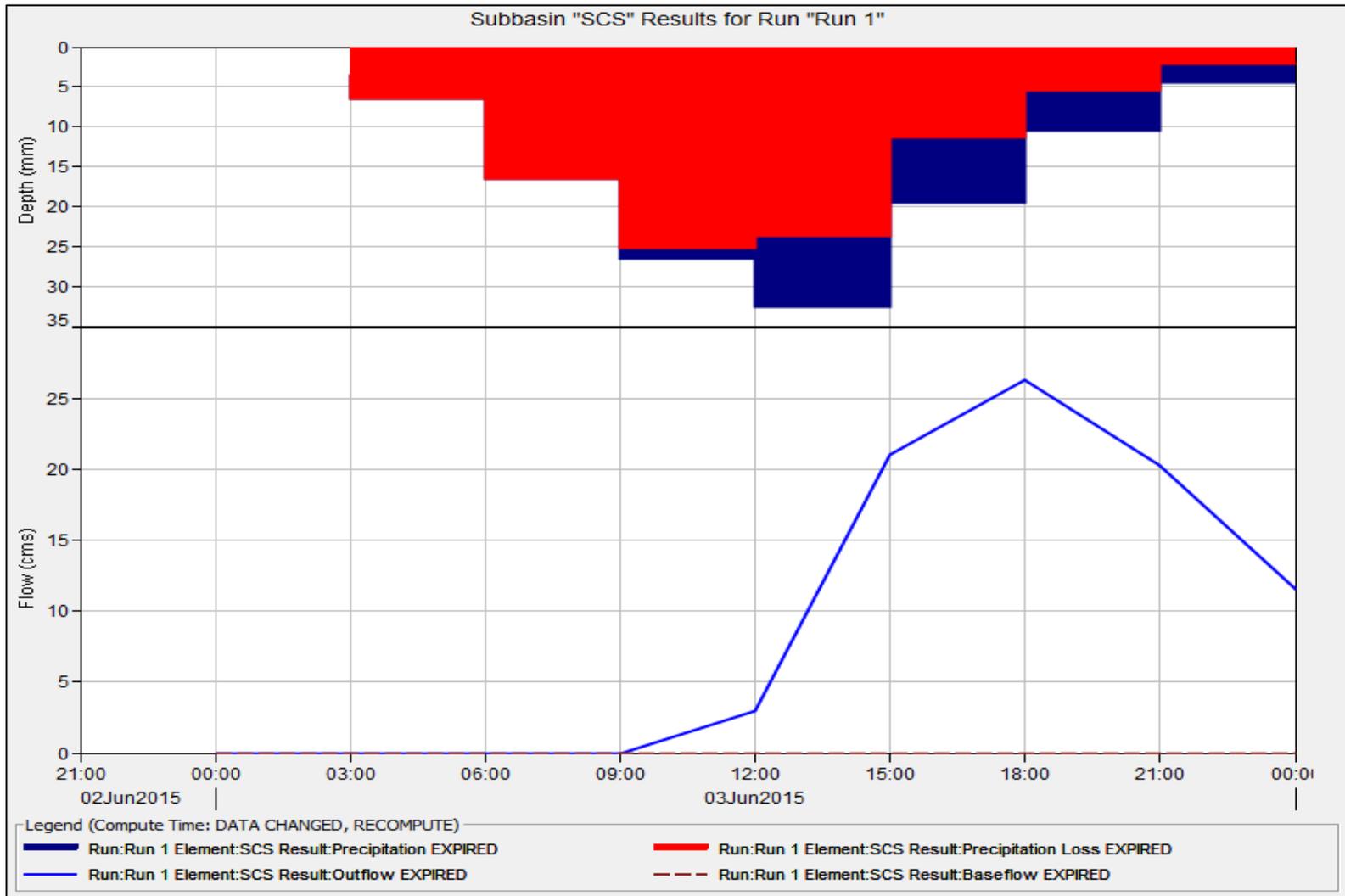


Figura 5.8: Simulación realizada en HEC-HMS versión 4.7.1 para escenario base, sin añadir efectos atribuibles a incendios forestales.

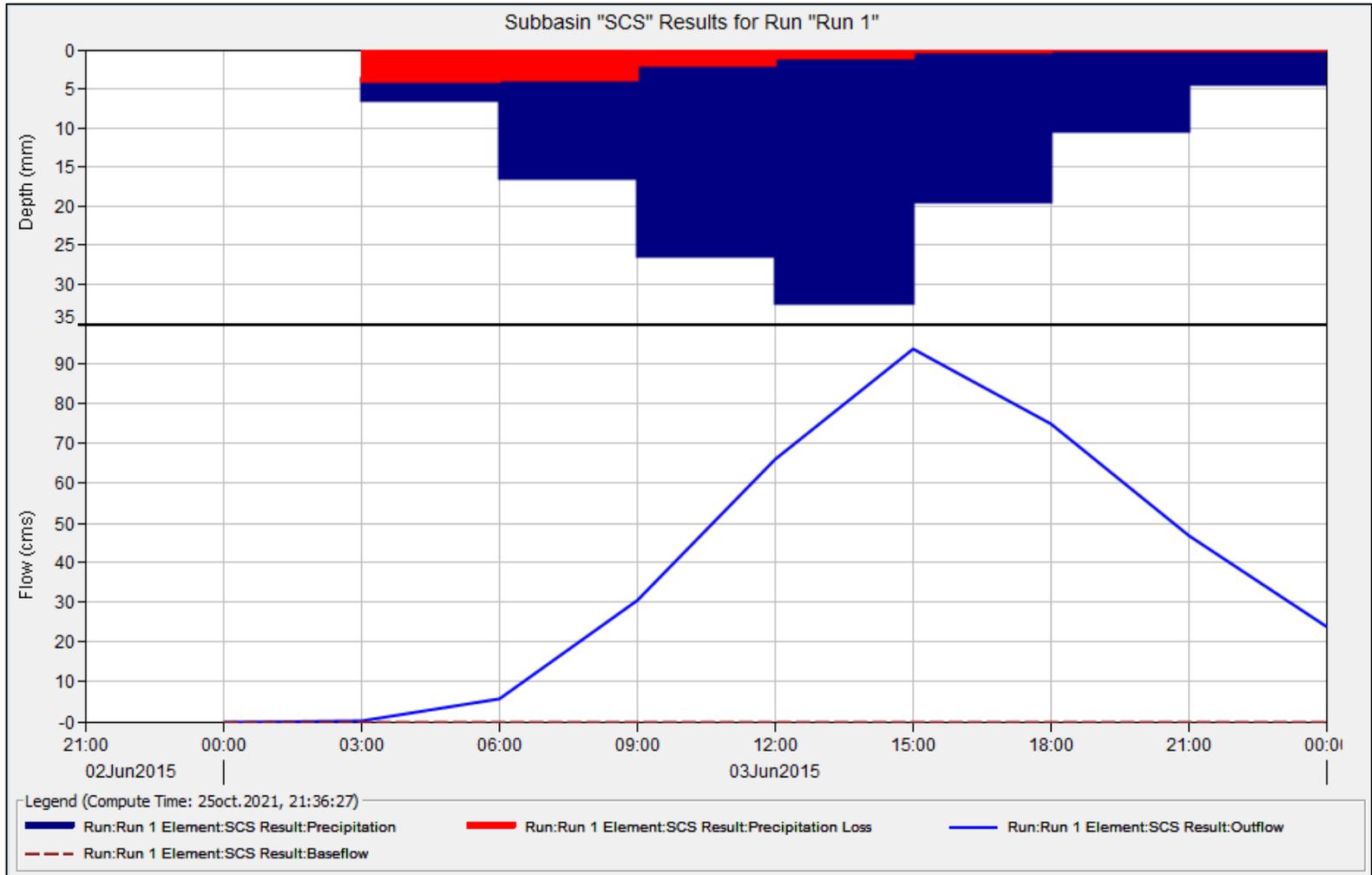


Figura 5.9: Simulación realizada en HEC-HMS versión 4.7.1 para escenario bajo efectos atribuibles a incendios forestales, para este caso hidrofobicidad de suelos quemado.

Las figuras presentadas anteriormente permiten vislumbrar el efecto que se genera al modificar el parámetro respectivo de la curva número entre un suelo en estado natural y otro perturbado, con efectos hidrofóbicos producto del incendio. La disminución del área de barras rojas, que representan la fracción de precipitación que infiltra al suelo, es notoria comparada con el escenario perturbado post—incendio, donde las barras azules que representan la fracción de precipitación que se transforma en escorrentía predominan. Se estableció que, según lo presentado anteriormente, el total de volumen de escorrentía en un escenario alterado aumenta en un 306% mientras que el total de volumen por infiltración disminuye en un 84%, respecto a lo obtenido en el escenario sin afección.

5.2.2 Obtención de gasto sólido de fondo

Para la obtención del gasto sólido de fondo es necesario conocer la granulometría del lecho y las alturas de escurrimiento para la sección en que se contempla la incorporación de la escorrentía en un escenario base y modificado hacia el río Maule.

Gracias a la batimetría y análisis granulométrico del estudio *“Metodología para el análisis físico de estuarios. Aplicación a Lebu, Tirúa y Constitución para restablecer la pesca artesanal”* realizado por el INH en la sección final del tramo del río Maule, en zonas cercanas a la desembocadura en la ciudad de Constitución, es que se logra extrapolar con datos locales la granulometría del lecho y morfología de la sección transversal del río Maule a utilizar para obtener el gasto sólido de fondo en un escenario base y modificado.

La Figura 5.10 muestra la distribución de las muestras granulométricas extraídas del informe y su ubicación respecto a la subcuenca experimental:

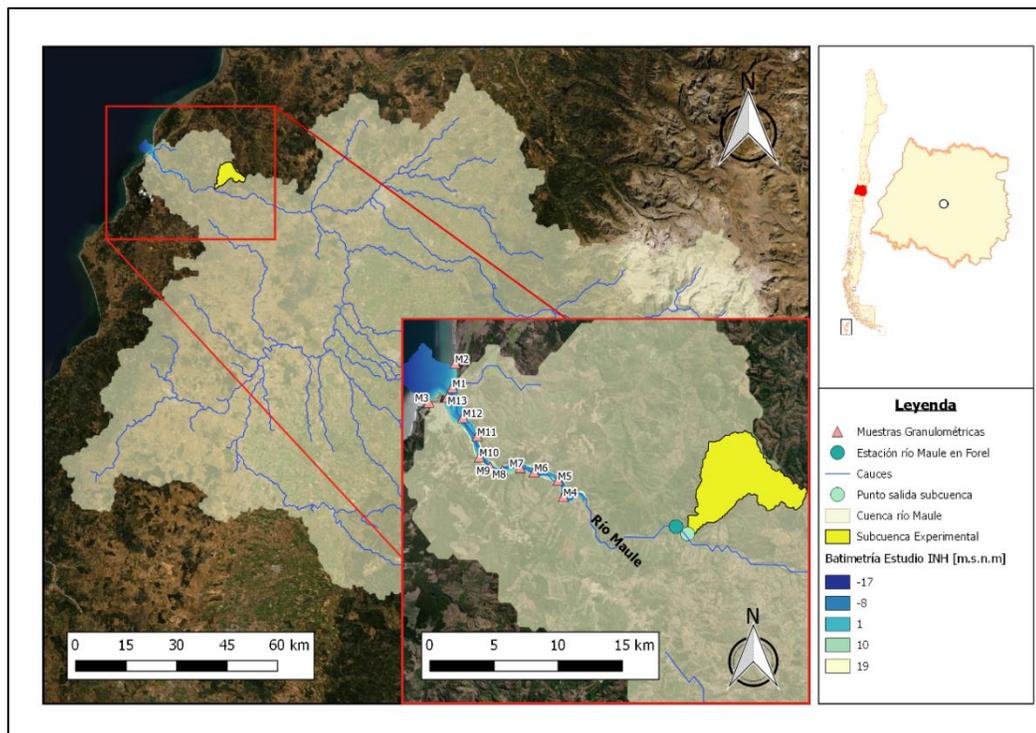


Figura 5.10: Muestras granulométricas y batimetría obtenida de estudio INH.

La extrapolación de los datos recopilados de batimetría y estudio granulométrico del informe señalado se basó en criterios de cercanía entre las muestras y los puntos de salida experimental y monitoreo de altura de escurrimiento por parte de la estación Maule en Forel. Además de lo comentado anteriormente se tomó en cuenta la ubicación de estos puntos dentro de la sinusoidal forma que adopta el río Maule en esta porción de su desarrollo.

Tal como se presenta en la Figura 5.12, el punto de monitoreo de caudal (punto rojo) y salida de la subcuenca experimental tienen una distancia aproximada de 2 kilómetros entre sí. El punto de salida de la subcuenca experimental se encuentra a la entrada de la sección sinusoidal del cauce, mientras que la Estación Maule en Forel se encuentra a la salida de esta. De manera análoga, la muestra granulométrica M4 se encuentra dentro de una curva sinusoidal del cauce, mientras que la medición M5 se encuentra fuera de ella.

Dicho esto, se definió que la muestra granulometría M5 permite realizar el cálculo del gasto sólido de fondo (GSF) extrapolado los diámetros característicos del lecho, en particular el diámetro medio (ver Figura 5.11):

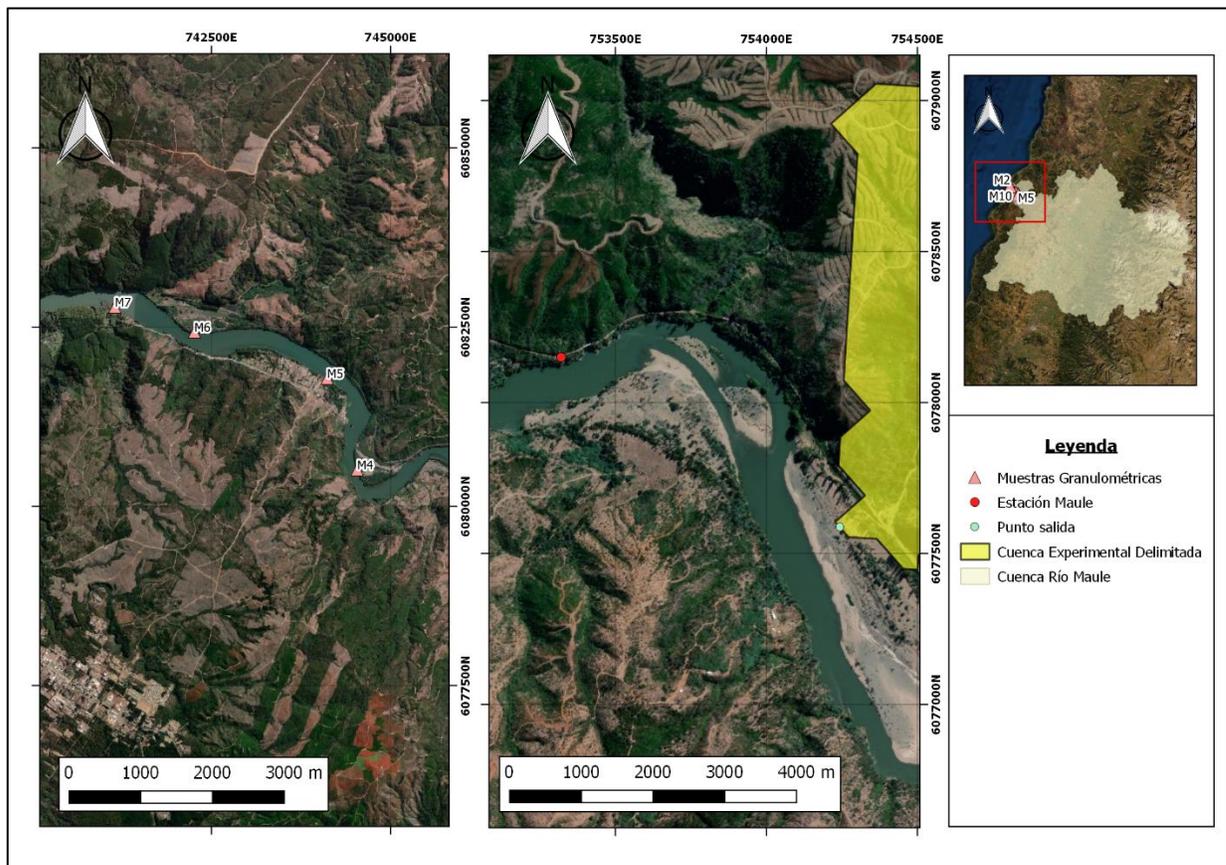


Figura 5.12: Ubicación del perfil M5 respecto a la cuenca experimental y la estación río Maule en Forel.

Para la obtención del gasto sólido de fondo en la sección propuesta, se ingresaron caudales del río Maule asociados a periodos de retorno de 2, 5 y 10 años (Tabla 5.8). La pendiente local del tramo se estimó según lo entregado por el modelo HEC-RAS en base a la batimetría del lecho del cauce, considerando $i = 0.0028$, gracias a los antecedentes entregados por la curva granulométrica de la muestra M5, se identificó como diámetro medio del lecho (d_{50}) un valor igual a 28.44 mm.

Tabla 5.8: Caudales propuestos para el cálculo de GSF y sus respectivos periodos de retorno.

Periodo de retorno T [años]	Prob. Excedencia	Caudal [m3/s]
2	50%	474
5	20%	1973
10	10%	3892

A los tres caudales con periodos de retorno distintos presentados anteriormente, se les adicionó la escorrentía simulada por el modelo HEC-HMS, con ello se obtuvo caudales modificados para un escenario base y un escenario afectado por el incendio forestal. Los valores obtenidos son presentados en la Tabla 5.9 y Tabla 5.10 respectivamente:

Tabla 5.9: Caudales con escorrentía añadida para escenario base.

Caudales Escenario Base [m3/s]			
Escorrentía _{base} [m3/s]	Q ₄₇₄	Q ₁₉₇₃	Q ₃₈₉₂
0	474	1973	3892
0	474	1973	3892
0	474	1973	3892
0	474	1973	3892
3	477	1976	3895
21	495	1994	3913
26	500	1999	3918
20	494	1993	3912
12	486	1985	3904

Tabla 5.10: Caudales con escorrentía añadida para escenario modificado.

Caudales Escenario Modificado [m3/s]			
Escorrentía _{base} [m3/s]	Q ₄₇₄	Q ₁₉₇₃	Q ₃₈₉₂
0	474	1973	3892
0	474	1973	3892
6	480	1979	3898
31	505	2004	3923
66	540	2039	3958
94	568	2067	3986
75	549	2048	3967
47	521	2020	3939
24	498	1997	3916

La Figura 5.13 presenta un esquema explicativo de las interpolaciones realizadas, de ella es posible observar qué información fue extraída de cada punto, con el objetivo de obtener los parámetros para el cálculo del GSF:

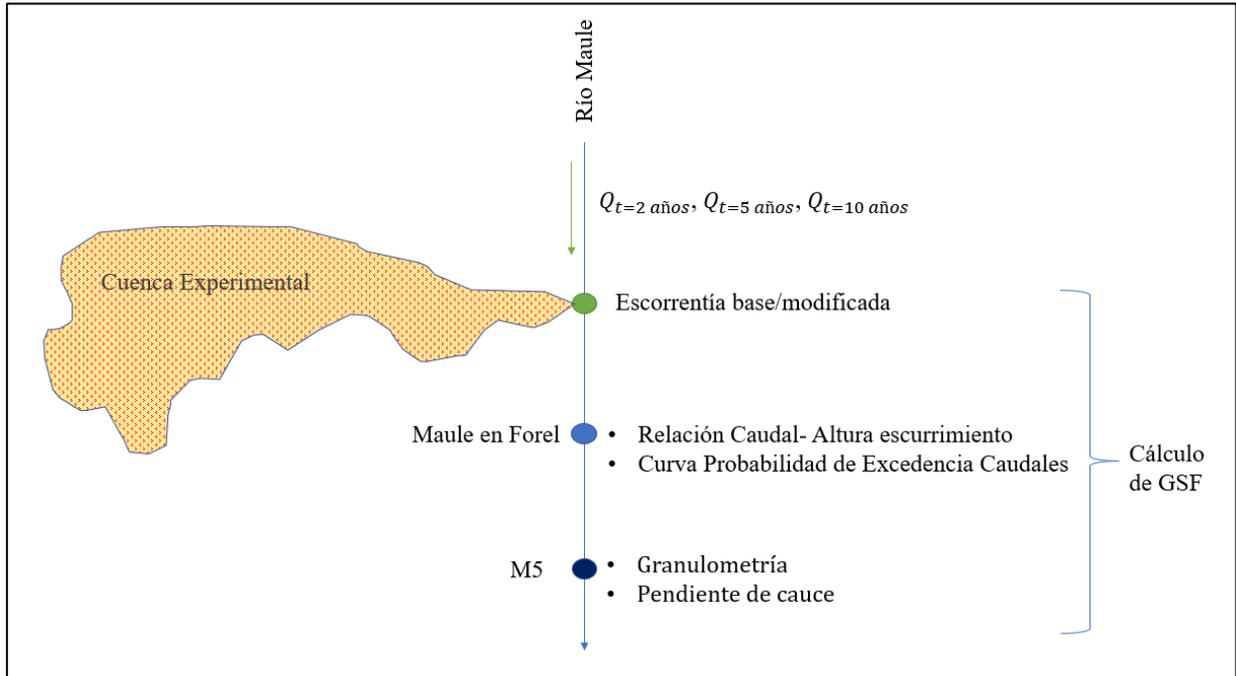


Figura 5.13: Esquema resumido de datos extrapolados y sus respectivas zonas.

Extrapolados los parámetros necesarios para el cálculo del GSF, se calculó para los 3 caudales con distinto periodo de retorno propuestos en las secciones anteriores y para 3 diferentes autores. Los resultados se presentan en la Tabla 5.11, Tabla 5.12 y Tabla 5.13:

Tabla 5.11: Resumen Diferencia porcentual de GSF adimensional obtenido para caudal con periodo de retorno de 2 años.

Caudal [m ³ /s]	Autor			
	Meyer-Peter y Müller	Ashida y Michiue	Fernández-Luque y van Beek	Engelund y Fredsoe
474	4.9%	5.9%	5.2%	5.2%
	10.1%	12.3%	10.7%	10.8%
	11.5%	14.0%	12.1%	12.3%
	7.6%	9.2%	8.0%	8.1%
	4.1%	5.0%	4.3%	4.4%
	2.0%	2.4%	2.1%	2.1%
Promedio	6.7%	8.1%	7.1%	7.1%

Tabla 5.12: Resumen Diferencia porcentual de GSF adimensional obtenido para caudal con periodo de retorno de 5 años.

Caudal [m3/s]	Autor			
	Meyer-Peter y Müller	Ashida y Michiue	Fernández-Luque y van Beek	Engelund y Fredsoe
1973	1.9%	2.1%	1.9%	2.0%
	3.9%	4.4%	4.0%	4.1%
	4.5%	5.1%	4.6%	4.7%
	3.0%	3.4%	3.0%	3.2%
	1.6%	1.8%	1.6%	1.7%
	0.8%	0.9%	0.8%	0.8%
Promedio	2.6%	3.0%	2.7%	2.8%

Tabla 5.13: Resumen Diferencia porcentual de GSF adimensional obtenido para caudal con periodo de retorno de 10 años.

Caudal [m3/s]	Autor			
	Meyer-Peter y Müller	Ashida y Michiue	Fernández-Luque y van Beek	Engelund y Fredsoe
3892	1.1%	1.2%	1.1%	1.1%
	2.2%	2.4%	2.2%	2.3%
	2.5%	2.8%	2.5%	2.6%
	1.7%	1.8%	1.7%	1.8%
	0.9%	1.0%	0.9%	1.0%
	0.4%	0.5%	0.4%	0.5%
Promedio	1.5%	1.6%	1.5%	1.5%

Los resultados presentados en las tablas anteriores permiten establecer variaciones de GSF promedio entre 1.5% y 8.1%, dependiendo del autor con que se estiman. Es interesante destacar que los mayores aumentos de GSF se evidencian para el caudal con menor valor (y por ende mayor probabilidad de ocurrencia), en contraste con lo que se obtiene para el mayor caudal utilizado (con periodo de retorno de 10 años).

Esta situación podría producirse por diferencias de magnitud entre un caudal con cierto periodo de retorno y las adiciones de escorrentía producidas por un comportamiento hidrofóbico del suelo quemado, no siendo despreciables estas últimas para caudales bajos. Caso contrario ocurriría cuando se tienen caudales con menor probabilidad de ocurrencia, asociados a mayores alturas de escurrimiento donde la variación del GSF son menores, generando pequeñas alteraciones respecto al valor base de un escenario pre-incendio.

En síntesis, el comportamiento hidrofóbico de una cuenca quemada y su efecto en el aumento de escorrentía, en perjuicio de una menor infiltración, repercutirá más en la variación del gasto sólido de fondo cuando se tengan caudales de menor periodo de retorno, incrementando así su capacidad de arrastre, debido a alteraciones en las condiciones de escorrentía en cuencas, producto del incendio.

Capítulo 6: Conclusiones y Comentarios Finales

6.1 Conclusión

El gran incendio forestal del año 2017 en la cuenca del río Maule significó una importante variación en la cobertura vegetal del suelo de extensas áreas que la conforman. Dicha situación da pie a al aumento de procesos erosivos en suelos quemados bajo diferentes severidades de fuego, provocados por agentes como la lluvia o el viento.

El estudio desarrollado anteriormente logró estimar, bajo la extrapolación de datos recopilados de estudios desarrollados tanto en territorio nacional como internacional, las variaciones de gasto sólido suspendido y gasto sólido de fondo, asociado a modificaciones provocadas por efectos de incendio en procesos hidrológicos como lo son la erosión provocada por precipitación y la infiltración, respectivamente. Lo anterior fue posible gracias al manejo de capas satelitales extraídas de diferentes fuentes, utilizando herramientas GIS junto con la extrapolación de datos extraídos del informe “*Hydrologic Analyses of Post Wildfire Conditions*” de la USDA.

La aplicación de la metodología RUSLE/SDR desarrollada en los capítulos anteriores concluye que, en comparación al registro sedimentométrico del periodo comprendido entre 1986 y 2016, la tasa promedio anual de gasto sólido suspendido para la cuenca del río Maule aumentará en un 167%. La situación anterior se basa en un aumento de sedimento aportante por proceso de lavado de cuencas afectadas por el incendio forestal de año 2017, el cual modificó drásticamente la cobertura vegetal de las áreas que conforman la cuenca del río Loncomilla y la cuenca del río Maule, aumentando la acción erosiva de agentes como la precipitación local. Cabe destacar que las principales variables que repercuten en los resultados obtenidos para potencial erosivo son las modificaciones de cobertura vegetal, contenidas en el factor C (Cover-management) y sujeta a la severidad de incendio catastrada y, por otro lado, la componente topográfica de los terrenos que fueron afectados, representadas por el factor LS (Length-Slope).

Por otro lado, con la aplicación del método de la curva número y, emulando un comportamiento hidrofóbico del suelo afectado, se obtuvo la variación de gasto sólido de fondo producto del aporte de escorrentía de una cuenca experimental, cuya superficie fue afectada completamente por el incendio del año 2017. El alcance local que tiene este análisis se debe a la poca información geomorfológica y de terreno en zonas interiores, pertenecientes a la cuenca del río Loncomilla, vitales para el cálculo del transporte de sedimento de fondo. Las modificaciones generadas en una cuenca experimental incendiada muestran que, ante un aumento de escorrentía directa, producto del comportamiento hidrofóbico de suelo quemado en su superficie, las tasas de gasto sólido de fondo aumentan entre un 1.5% a 8.1%, obteniendo las mayores variaciones (respecto a un escenario base) en caudales con menor periodo de retorno.

6.2 Comentarios Finales

La metodología empírica RUSLE posee la ventaja de ser confiable, versátil y de aplicación universal producto de incontables estudios que han ido perfeccionando su funcionamiento gracias a la información levantada en terreno en otras partes del mundo. La aplicación del modelo complementario SDR permite agregar una importante función a la metodología para esta investigación, como lo es el cálculo de transporte y depositación de sedimento por lavado de cuenca.

La certeza que tiene la metodología empírica aplicada depende fundamentalmente del rigor con los factores que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causa y efectos (Almorox *et al.*, 1994). El desarrollo de nuevos modelos de análisis remoto, junto con la disponibilidad de información satelital de mayor resolución, da una idea de la vigencia y aplicabilidad de esta metodología y sus futuras versiones. Es recomendable establecer investigaciones que permitan vislumbrar el rendimiento de esta técnica por ejemplo en cuencas de menor tamaño, donde exista apoyo de técnicas en terreno y monitoreo, como fotogrametría con drones o imágenes satelitales con mayor resolución espacial, generando así una relación entre remoción de suelos producto de modificaciones en la topografía (y por ende volumen de suelo erosionado) y montos obtenidos mediante la aplicación de la metodología RUSLE.

Una desventaja observada en la recopilación de información relacionada con los estudios que abarca esta memoria corresponde a la diferencia en las formas en que se mide el transporte de sedimentos en suspensión y de fondo por parte de la DGA para cada uno de los sectores en que se ubican las estaciones, producto de la aplicación de metodologías variadas e instrumentos de monitoreo rudimentarios. Esto se traduce en la necesidad de extrapolar información disponible de una cuenca a otra con el propósito de comparar el rendimiento de la metodología aplicada, no obstante los esfuerzos de diferentes instituciones y organismos, desarrollando estudios que permitan caracterizar, comprender y entender de mejor manera los procesos hídricos que se desarrollan en nuestro país da paso a que este tipo de investigación se sustente cada vez más en información local, reduciendo de manera importante la incertidumbre de los resultados obtenidos producto de extrapolación de datos.

Es importante complementar los estudios de este informe con proyecciones de precipitación en el actual escenario de sequía que afecta nuestro país, pudiendo así contextualizar mucho más los resultados en las variaciones del gasto sólido suspendido y de fondo. Es recomendable modificar, en la metodología RUSLE, los valores asociados a técnicas de recuperación (factor P), así se podrá apreciar los efectos positivos que tiene invertir en técnicas de reforestación y prevención de incendios, además de la regeneración natural de la cobertura vegetal del suelo.

El incendio forestal del año 2017 es considerado el más catastrófico en la historia de la protección de la naturaleza en Chile, afectando más de 500.000 ha de la zona centro-sur de nuestro país (CONAF, 2017). Los incendios forestales son parte inevitable de la modificación y evolución de ecosistemas en todo el mundo, con las actuales condiciones que conlleva el cambio climático (aumento de temperatura y disminución de precipitaciones), se prevé la magnitud y frecuencia de estos últimos irá en aumento. Aplicar medidas por parte de autoridades, desarrollando planes de acción conjunta de restauración, protección y prevención, ayudará de gran manera en la disminución del impacto de este tipo de eventos.

Capítulo 7: Bibliografía

A. K. Tiwari, L. M. Risse, & M. A. Nearing. (2000). EVALUATION OF WEPP AND ITS COMPARISON WITH USLE AND RUSLE. *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1129–1135. <https://doi.org/10.13031/2013.3005>

Almorox, J., R. De Antonio, A. Saa, M. Cruz y J.M. Gasco. (1994). Métodos de estimación de la erosión hídrica. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid.España. 150 pp.

Benavides-Solorio, J., & MacDonald, L. H. (2001). Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, 15(15), 2931–2952. <https://doi.org/10.1002/hyp.383>

Bonilla, C. A., & Vidal, K. L. (2011). Rainfall erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*, 410(1–2), 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.022>

Bonilla, Carlos A; Reyes, José L y Magri, Antoni (2010). Water Erosion Prediction Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS Framework, Central Chile. *Chilean J. Agric. Res.* [online]. 2010, vol.70, n.1, pp.159-169. ISSN 0718-5839.

Bradbury, K., Dripps, W., Hankley, c., Anderson, M. y Potter, k. (2000). Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates. *Wisconsin: University of Wisconsin*, pp. 84.

Canfield, H. E., Goodrich, D. C., & Burns, I. S. (2005). Selection of Parameters Values to Model Post-Fire Runoff and Sediment Transport at the Watershed Scale in Southwestern Forests. *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts*. [https://doi.org/10.1061/40763\(178\)48](https://doi.org/10.1061/40763(178)48)

Chow, V., Maidment, D., Mays, L., (1994). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

CONAF (2017). Análisis de la Afectación y Severidad de los Incendios Forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos de Chile. Informe Técnico. 56 p. Santiago, Chile.

CONAF (2017). El gran incendio de Chile 2017: Descripción e impactos. Seminario CEP: Los Incendios Forestales Y Sus Consecuencias En Los Ecosistemas. Santiago. Recuperado de https://www.conaf.cl/tormenta_de_fuego-2017/GRAN-INCENDIO-DE-CHILE-VERANO-2017-DESCRIPCION-Y-EFECTOS-EN-ECOSISTEMAS_VEGETACIONALES_SEMINARIO-CEP-MAYO-2017.pdf

Debano, L. F., Neary, D. G. y Ffolliott, P. F. (1998): *Fire's effects on ecosystems*. New York. John Wiley and Sons.

DGA, Ministerio de obras públicas. (1991). *Precipitación Máxima en 1, 2 y 3 días*. 1991.

Di Gregorio, A. and Jansen, L.J.M. (2005). Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual.

Doerr, S., Shakesby, R., & Walsh, R. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1–4), 33–65. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(00)00011-8)

Dumas P., Printemps J, (2010). Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands, Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan, pp. 856–866, 2010.

Escobar, D (2019). Estimación de la erosión hídrica en zona semiárida del norte chileno mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE): El caso de Punitaqui (IV Región de Coquimbo). Memoria para optar al título profesional de Geógrafo.

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

González, M. E., & Veblen, T. T. (2007). Incendios en bosques de *Araucaria araucana* y consideraciones ecológicas al madereo de aprovechamiento en áreas recientemente quemadas. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80(2), 243–253. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2007000200009>

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), pp. 275. Recuperado de <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/56/3/275/4075/EROSIONAL-DEVELOPMENT-OF-STREAMS-AND-THEIR?redirectedFrom=fulltext>

Imeson, A., Verstraten, J., van Mulligen, E., & Sevink, J. (1992). The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *CATENA*, 19(3–4), 345–361. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(92\)90008-y](https://doi.org/10.1016/0341-8162(92)90008-y)

Julien, P. Y. (2021). *River Mechanics* by Pierre Y. Julien (2002–08-19). Cambridge University Press; 1 edition (2002–08-19).

Kamuju, N. (2016). Soil Erosion and Sediment Yield Analysis Using Prototype & Enhanced SATEEC GIS System Models. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 5(1), pp. 1471–1482. Recuperado de <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.39>

Key, Carl H.; Benson, Nathan C. (2006). Landscape Assessment (LA). In: Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. LA-1-55

- M.O.P. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Recuperado de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Maule.pdf>
- M.O.P. (2010). Manual de Carreteras (Volumen No3: Instrucciones y criterio de diseño ed., Vol. 3). Recuperado de http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/manualdecarreteras/Documents/MC-V3_Dic-2010-INDICE-WEB.pdf
- Mattos, R. (1999). Erosión y transporte de sedimentos. En: Pequeñas obras hidráulicas, capítulo 3. UNESCO. ISBN 92-9089-069-X.
- Michiels, P., Gabriels, D. (1996). Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean environments.
- Moore I.D., Nieber J.L. (1989). Landscape Assessment of Soil Erosion and Nonpoint Source Pollution. *Journal of the Minnesota Academy of Science (USA)*, vol. 55, pp. 18–25.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- NCRS (2009). National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 7 Hydrologic Soil Group. January 2009.
- Nearing, M., Pruski, F. and O’Neal, M. (2004) Expected Climate Change Impacts on Soil Erosion Rates: A Review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59, 43-50.
- Niño. Y. (2020). Apuntes Curso Transporte Hidráulico de Sólidos, Mecanismo del Transporte de Sedimentos. Universidad de Chile.
- Parson, Annette; Robichaud, Peter R.; Lewis, Sarah A.; Napper, Carolyn; Clark, Jess T. (2010). Field guide for mapping post-fire soil burn severity. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 49 p.
- Prosser, I. P., & Williams, L. (1998). The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus Forest. *Hydrological Processes*, 12, 251–265. Recuperado de [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199802\)12](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12)
- Renard, K. G., & Ferreira, V. A. (1993). RUSLE Model Description and Database Sensitivity. *Journal of Environmental Quality*, 22(3), 458–466. Recuperado de <https://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200030009x>
- Shakesby, R. and Doerr, S., (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74(3-4), pp.269-307. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.006>

Shakesby, R., Wallbrink, P., Doerr, S., English, P., Chafer, C., Humphreys, G., Blake, W., & Tomkins, K. (2007). Distinctiveness of wildfire effects on soil erosion in south-east Australian eucalypt forests assessed in a global context. *Forest Ecology and Management*, 238(1–3), 347–364. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.10.029>

Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay DWS, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron DAK, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik MBJ, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl ALR, Bierbower W, Denu D, Douglass J (2018) InVEST 3.7.0. User's guide the natural capital project. University of Minnesota, Minnesota

Stewart B. A., Woolhiser, D. A., Wischmeier W. H., Caro, J. H., & Frere, M. H. (1975). Control of Water Pollution from Cropland. Volume I, A manual for guideline development. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington D.C.

Tamene L, Le QB (2015) Estimating soil erosion in sub-Saharan Africa based on landscape similarity mapping and using the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Nutr Cycl Agroecosyst* 102(1), pp. 17–31.

USDA. (2016). Hydrologic Analyses of Post-Wildfire Conditions (No. 4). Natural Resources Conservation Service. Recuperado de <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=39877.wba>

Varas, E., (1985). Hietogramas de tormentas de diseño. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Concepción.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1960) An Universal Soil Loss Estimating Equation to Guide Conservation Farm Planning. 7th International Congress of Soil Sciences, 418-425.

Wondzell, S. M., & King, J. G. (2003). Postfire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain regions. *Forest Ecology and Management*, 178(1–2), 75–87. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(03\)00054-9](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(03)00054-9)

ANEXOS

Anexo A: Construcción de capas RUSLE

a) Clasificación especies vegetales, capa de cobertura vegetal (Factor C)

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	C Factor
	120 Invernaderos		0.1
	130 Otros Cultivos		0.1
	140 Huertos		0.1
	150 Barbechos		1
200 Bosques	210 Nativo de Hoja Ancha	211 Primarios	0.004
		212 Renovales	0.009
	220 Nativo de Coníferas	221 Primarios	0.004
		222 Renovales	0.009
	230 Mixtos	231 Primarios	0.004
		232 Renovales	0.009
	240 Plantaciones de Hoja Ancha	241 Adultas	0.01
		242 Cosechas	1
	250 Plantaciones de Coníferas	251 Adultas	0.01
		252 Cosechas	1
300 Pastizales	310 Praderas	311 Anuales	0.38
		312 Perennes	0.38
	320 Otros Pastizales		0.38
	330 Pastizales Áridos		0.38
400 Matorrales	410 Matorrales		0.13
	420 Matorrales Arborescentes		0.13
	430 Suculentas		0.13
	440 Plantación de Matorrales		0.13
	450 Otros Matorrales Áridos		0.13
500 Humedales	510 Marismas		0.28
	520 Pantanos		0.28
	530 Otros Humedales		0.28
600 Cuerpos de Agua	610 Lagos		0
	620 Reservorios		0
	630 Ríos		0
	640 Océano		0
800 Superficies Impermeables			1
900 Tierras desnudas	910 Salares		1
	920 Suelos arenosos		1
	930 Suelos rocosos	931 Rocas	1
		932 Gravas	1
1000 Hielo /Nieves	1010 Nieve		0
	1020 Hielo		0
1200 Nubes			0

Tabla A.1: Clasificación y asignación de valor de factor de cobertura vegetal para zona de estudio (Di Gregorio, 2005).

b) Clasificación de tipo de suelo por composición, capa de erodabilidad (factor K)

Clase Saga	Clase Textura de Suelo		Contenido de materia orgánica			
	Ingles	Español	<0,5	2	4	Promedio
1	clay	arcilloso	0,13 a 0,29			0.21
2	silty clay	arcillo limoso	0.25	0.23	0.19	0.22
3	silty clay loam	franco arcillo limoso	0.37	0.32	0.26	0.32
4	sandy clay	arcillo arenoso	0.14	0.13	0.12	0.13
5	sandy clay loam	franco arcillo arenoso	0.27	0.25	0.21	0.24
6	clay loam	franco arcilloso	0.28	0.25	0.21	0.25
7	silt	limoso	0.6	0.52	0.42	0.51
8	silt loam	franco limoso	0.48	0.42	0.33	0.41
9	loam	franco	0.38	0.34	0.29	0.34
10	sand	arenoso	0.05	0.03	0.02	0.03
11	loamy sand	areno francoso	0.12	0.1	0.08	0.10
12	sandy loam	franco arenoso	0.27	0.24	0.19	0.23

Tabla A.2: Clasificación de suelos según contenido orgánico (Stewart, 1975).

Anexo B: Capas RUSLE

a) Capa de Precipitación (Factor R)

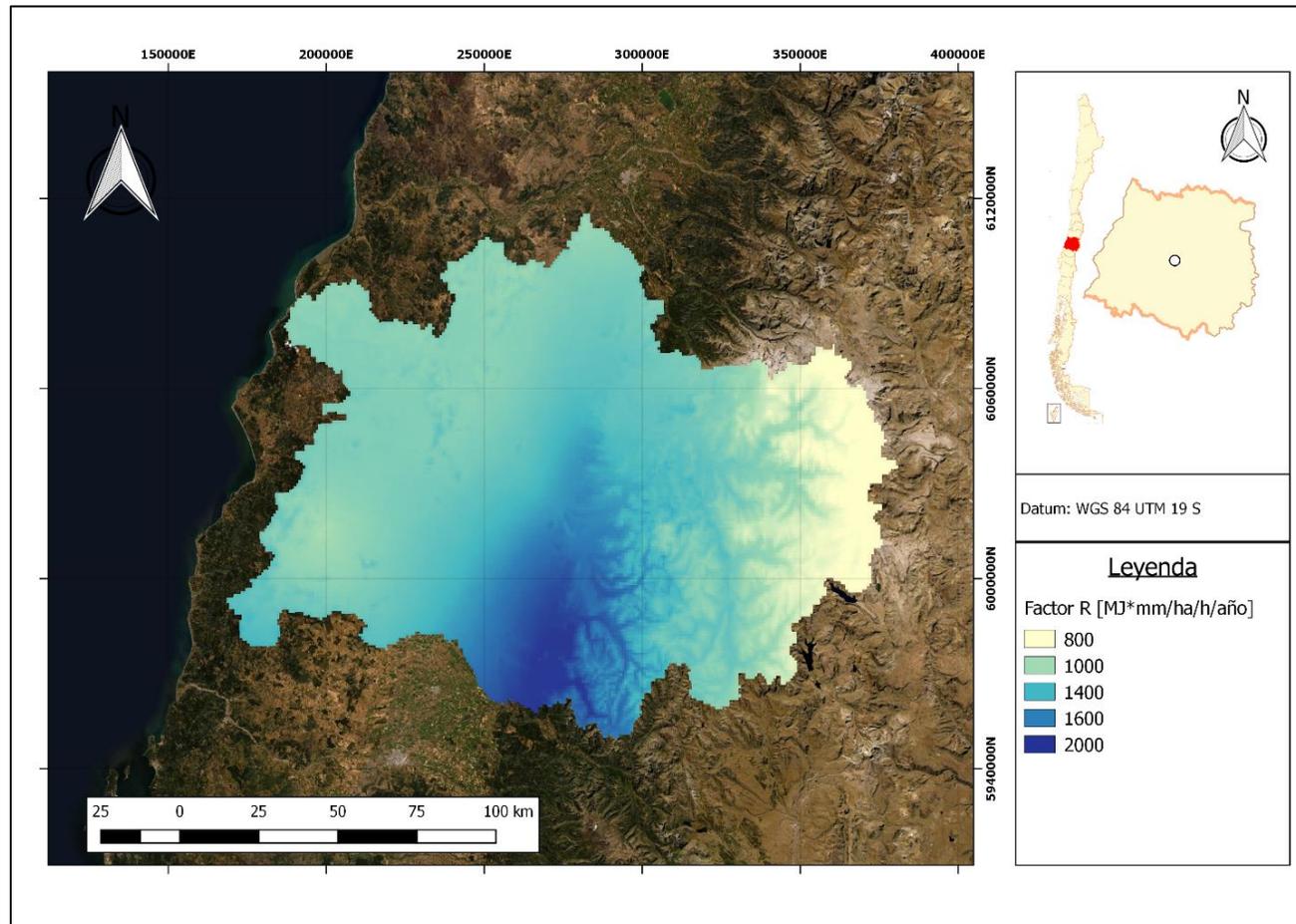


Figura A.1: Factor de precipitación R.

b) Capa de Cobertura Vegetal (Factor C), Pre-Incendio

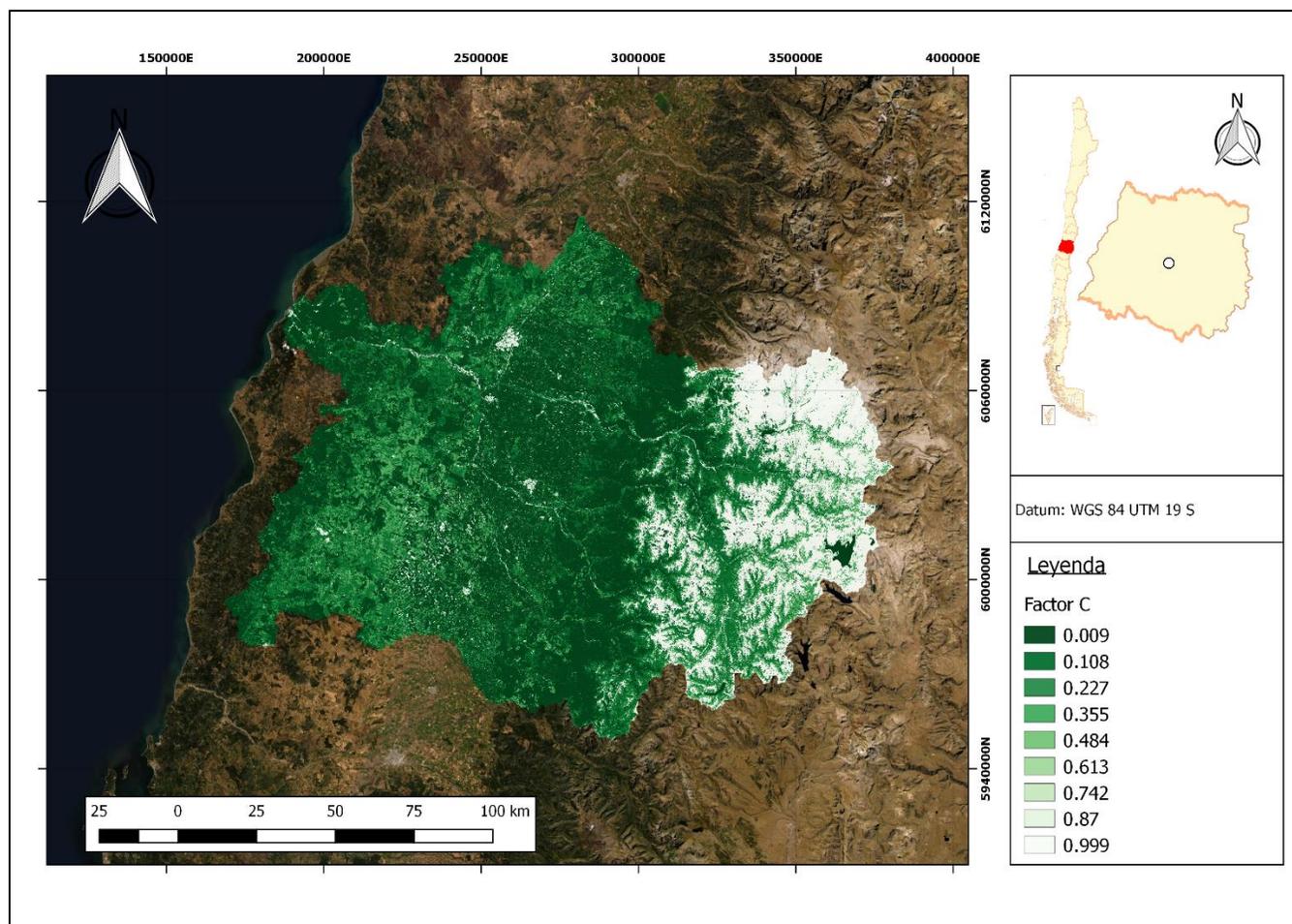


Figura A.2: Distribución espacial del factor de Cobertura Vegetal para la zona de estudio.

c) Capa de Cobertura Vegetal (Factor C), Post-Incendio

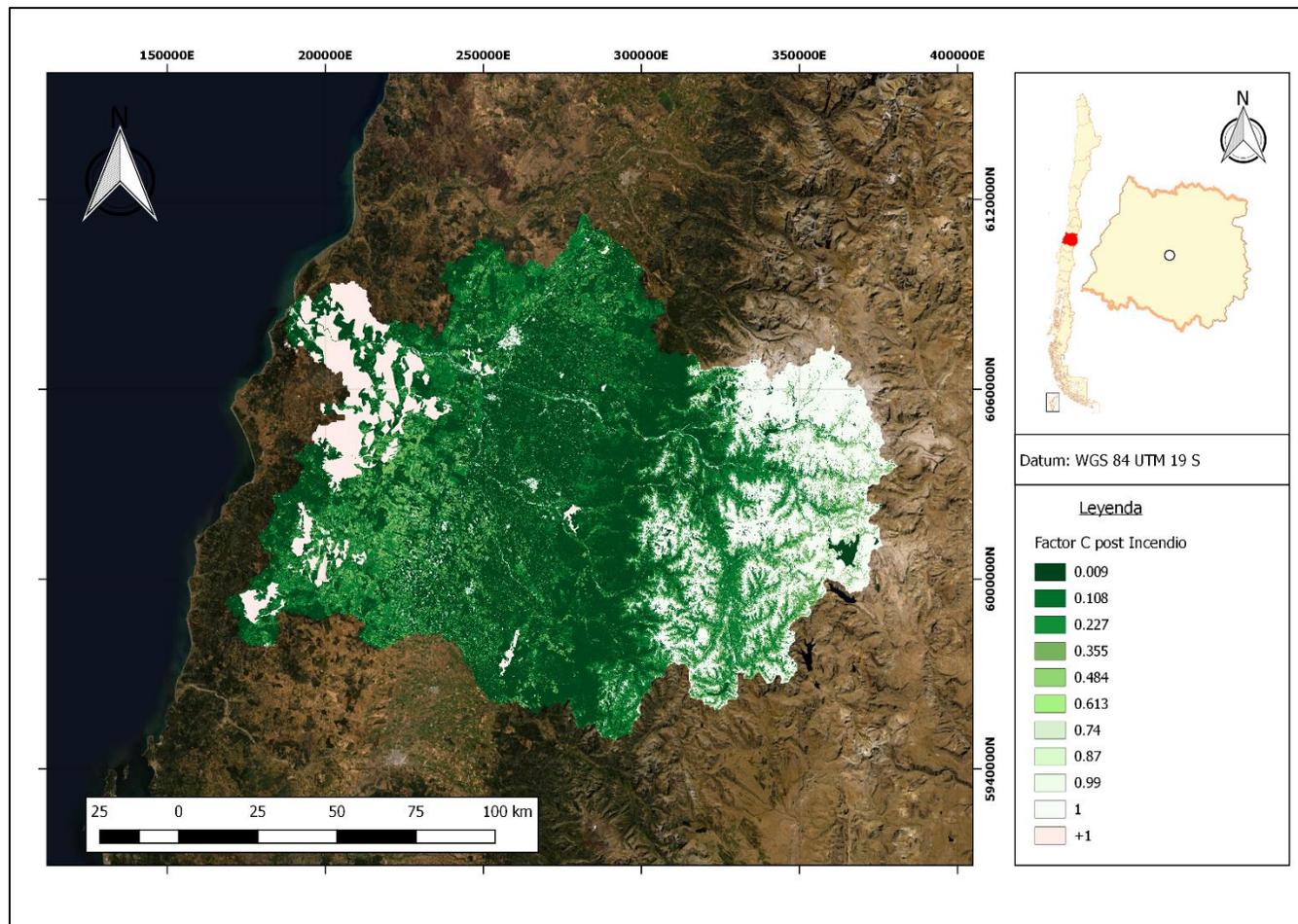


Figura A.3: Modificación espacial del factor C provocado por la severidad del incendio del año 2017.

d) Capa Longitud/Pendiente (Factor LS)

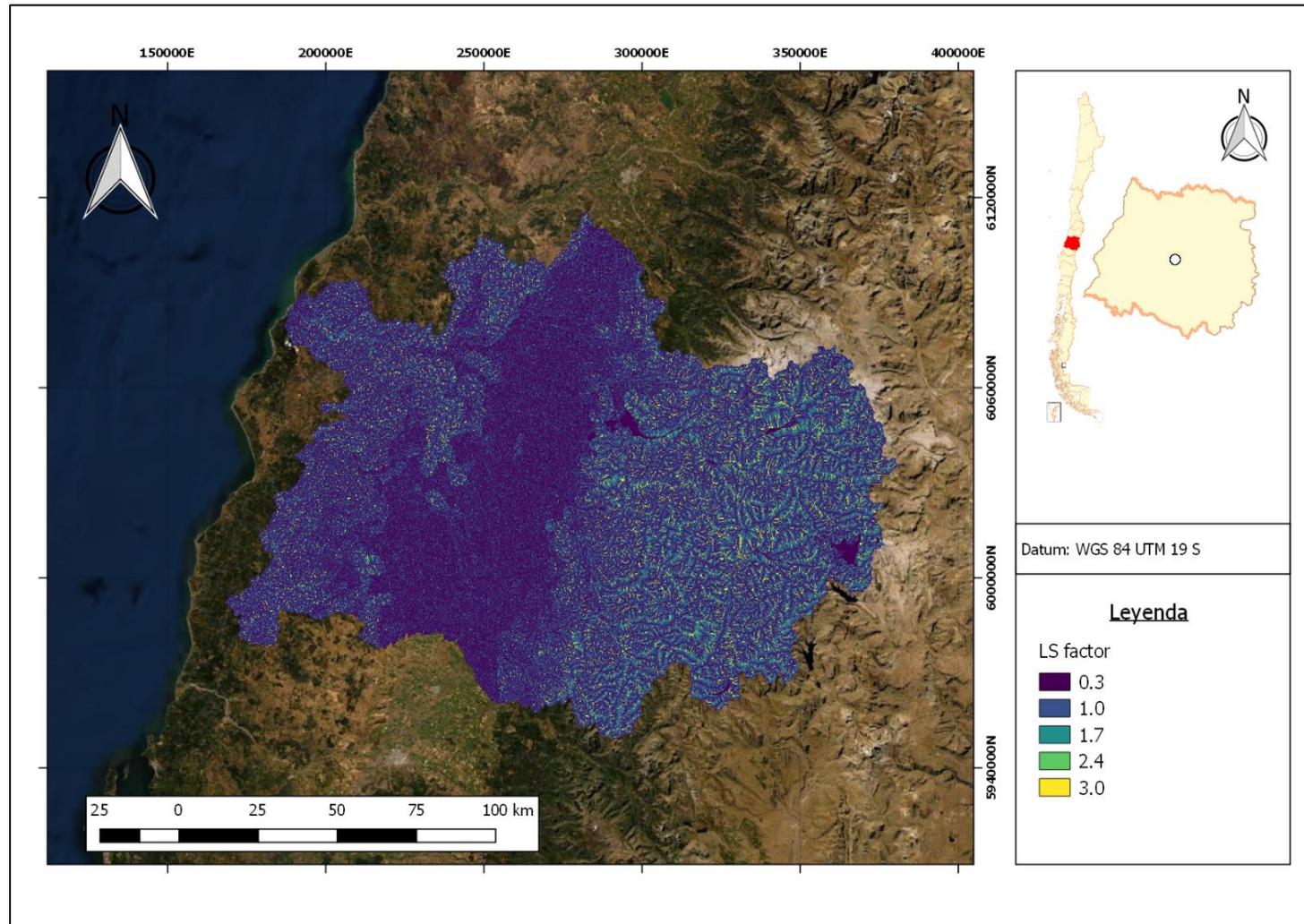


Figura A.4: Distribución espacial del factor Length-Slope.

e) Capa de Erodabilidad (Factor K)

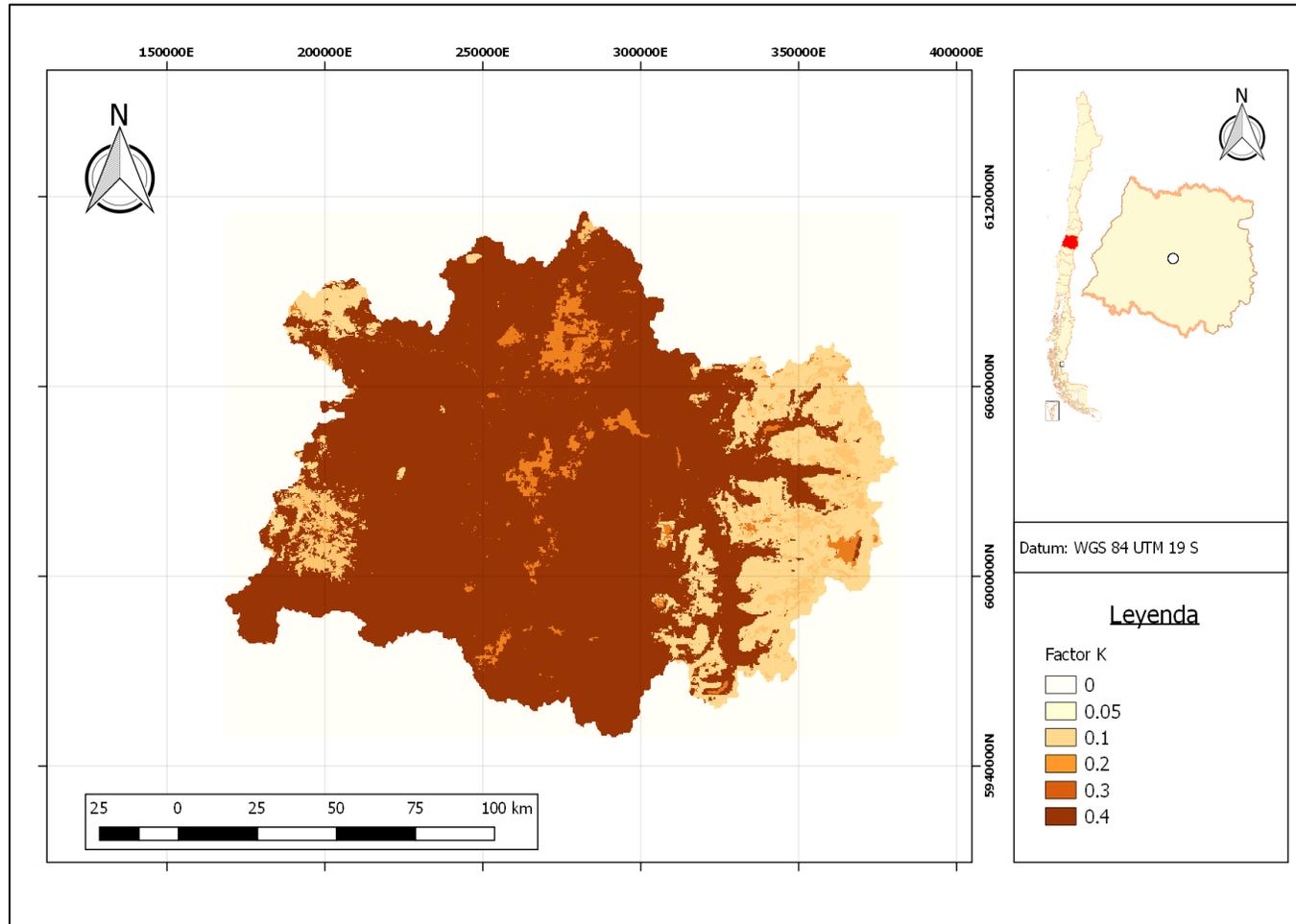


Figura A.5: Distribución espacial en la zona de estudio del factor de Erodabilidad de suelos.

Anexo C: Histograma de valores por capa

a) Factor R

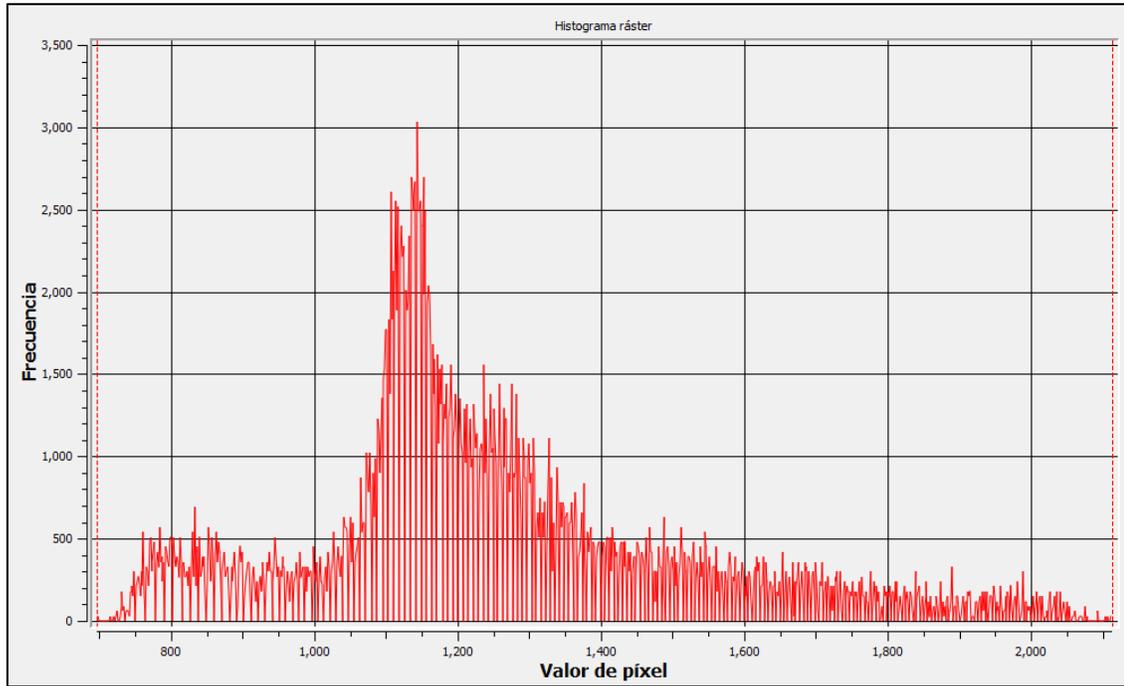


Figura A.6: Histograma para valores de capa factor R.

b) Factor C Pre-Incendio

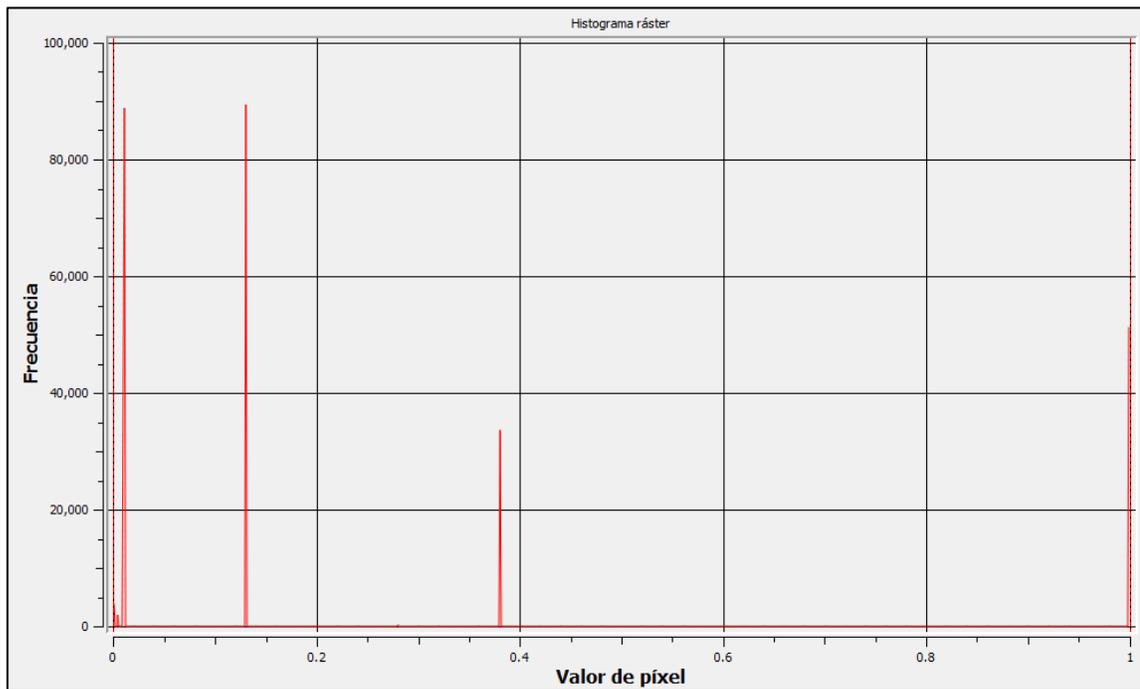


Figura A.7: Histograma para valores de capa factor C pre-incendio.

c) Factor C Post-Incendio

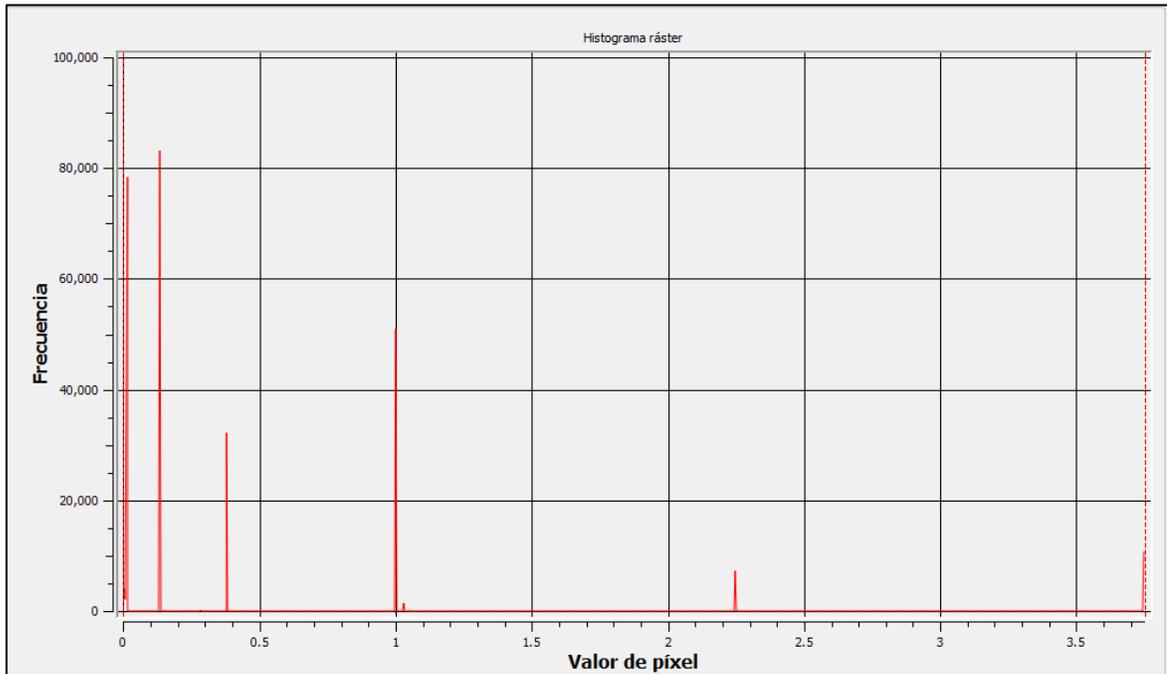


Figura A.8: Histograma para valores de capa factor C post-incendio.

d) Factor LS

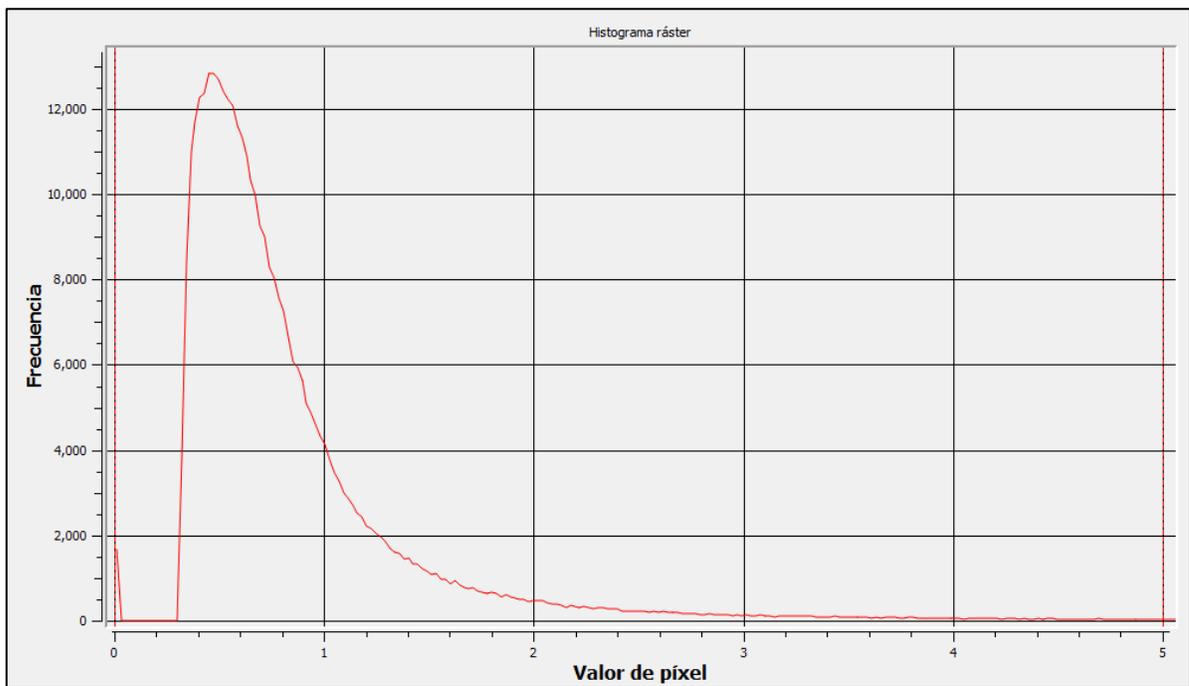


Figura A.9: Histograma para valores de capa factor LS.

e) Factor K

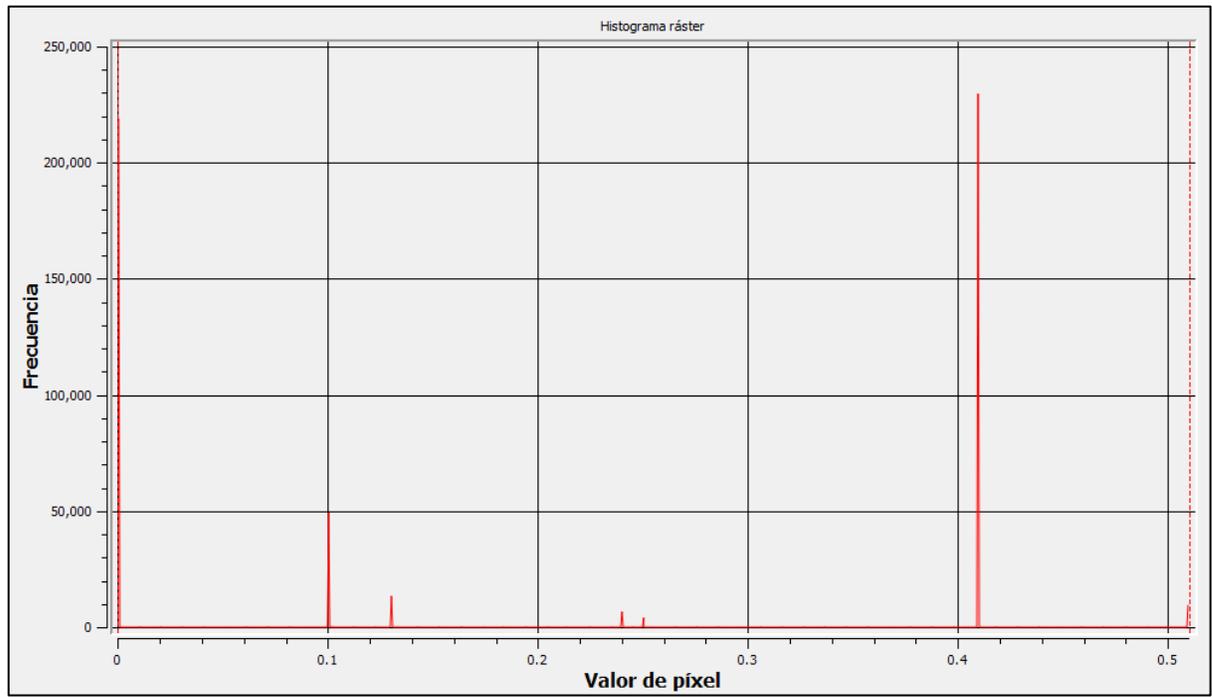


Figura A.9: Histograma para valores de capa factor K

Anexo D: Modelo HEC-RAS, batimetría

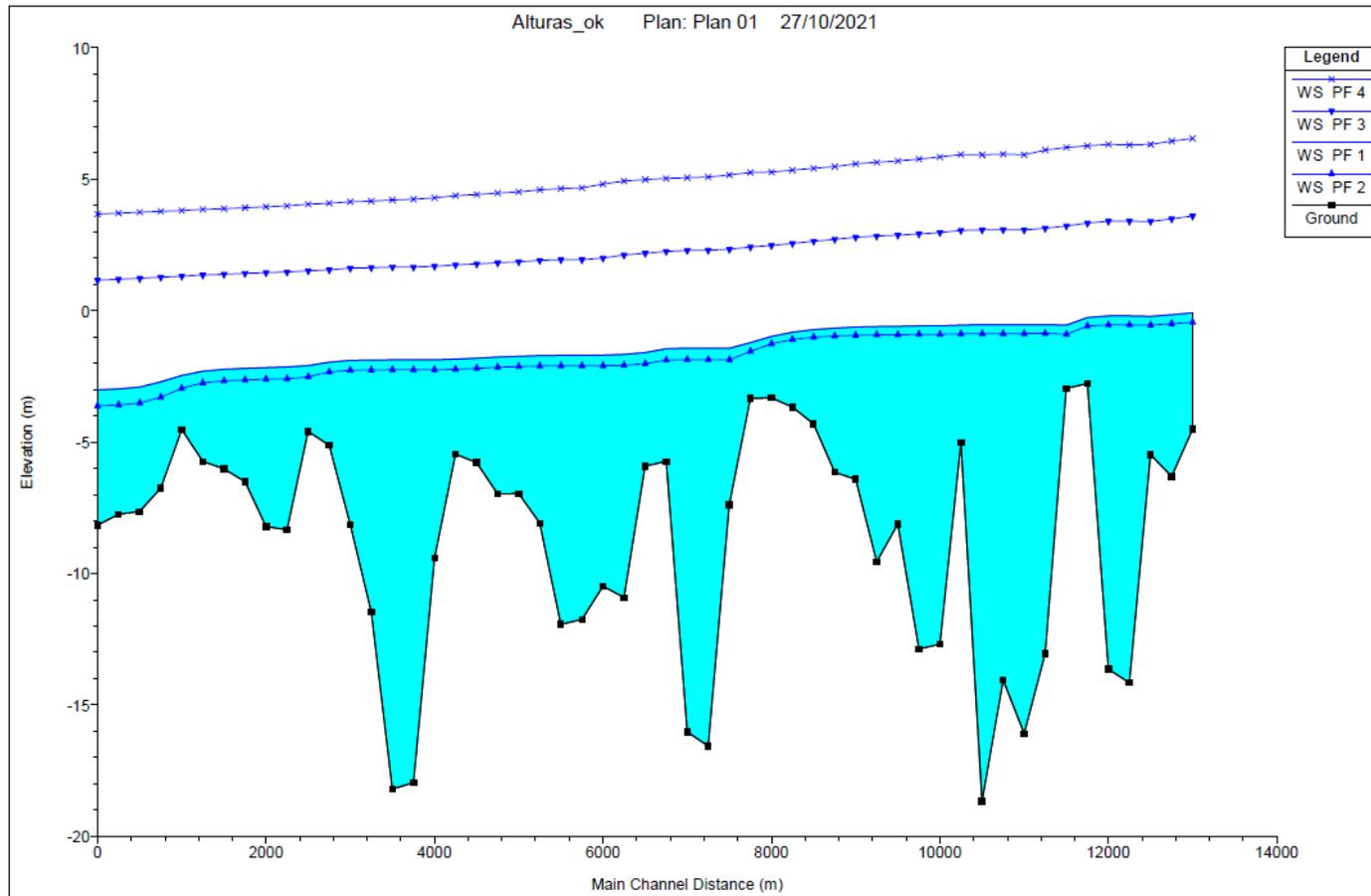


Figura A.10: Perfil longitudinal batimetría río Maule.

Anexo E: Curva granulométrica M5, estudio INH.

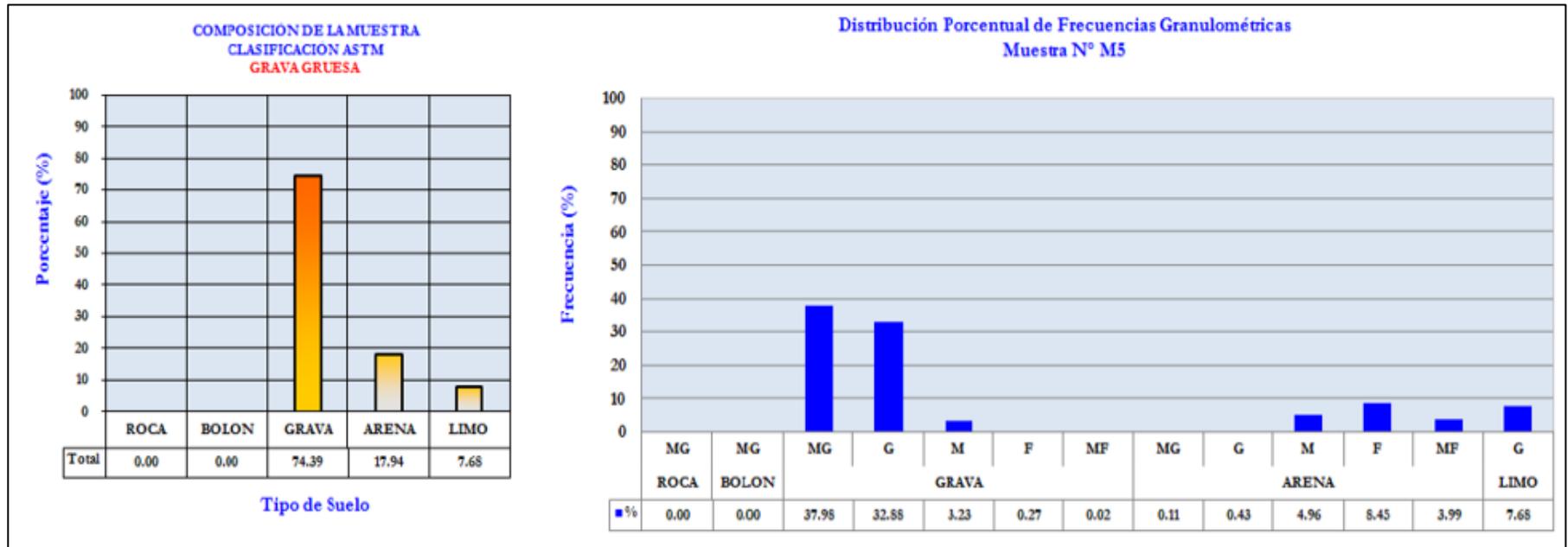


Figura A.11: Análisis distribución granulométrica de muestra M5

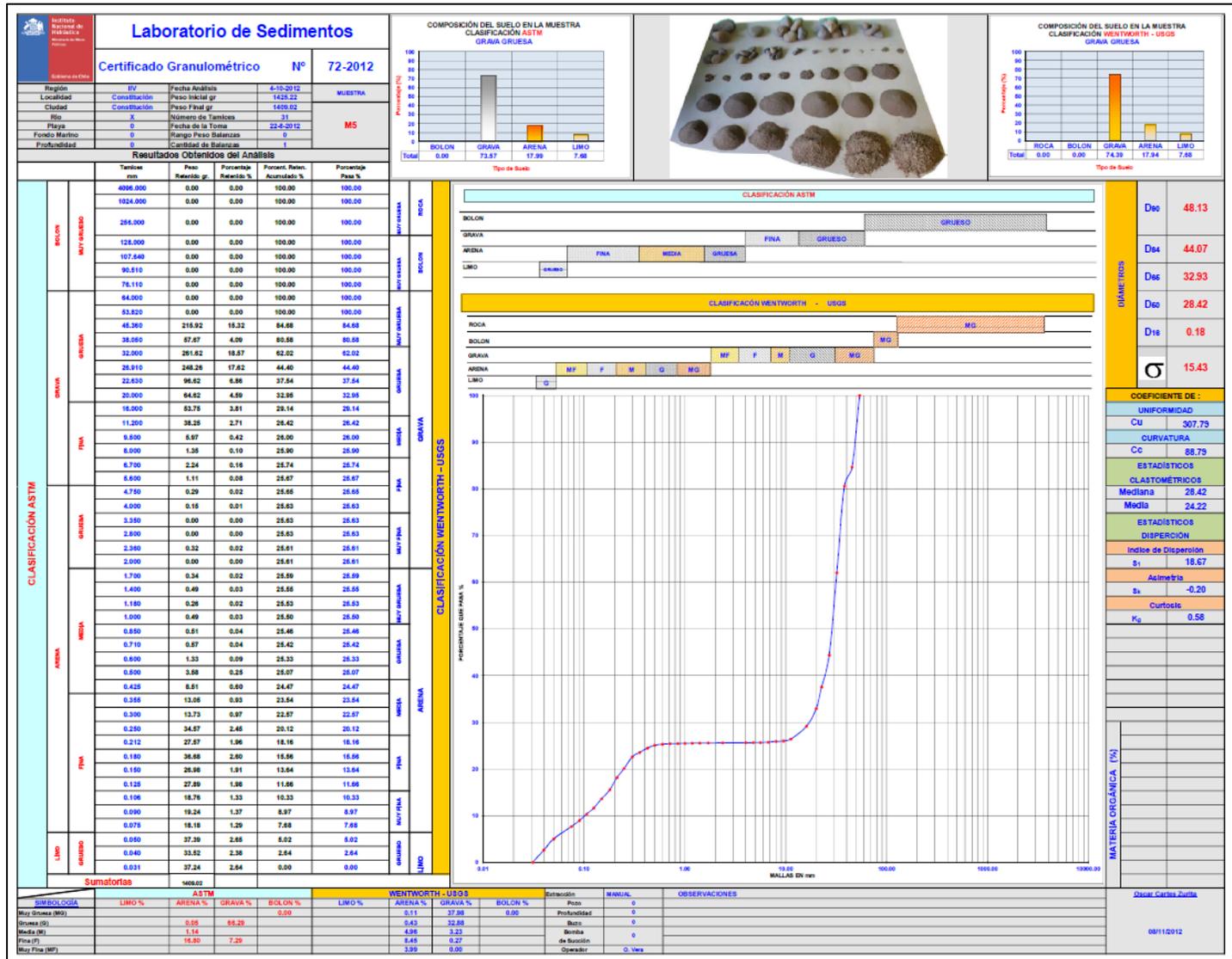


Figura A.12: Curva granulométrica de muestra M5 y diámetros característicos

Anexo F: Cálculo de GSF.

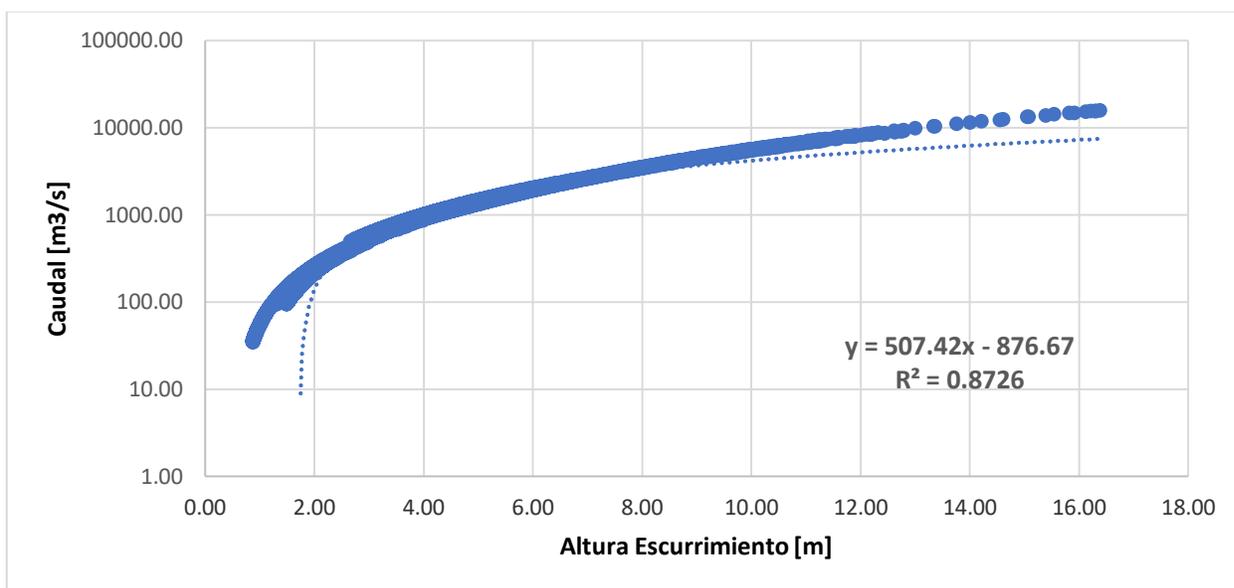


Figura A.13: Relación caudal y altura de escurrimiento, río Maule en Forel

Escenario Inalterado (T= 2 años)						
Caudal [m3/s]	474	476.9	495.1	500.3	494.3	485.5
Altura [m]	2.66	2.67	2.70	2.71	2.70	2.68

Tabla A.3: Caudales inalterados con periodo de retorno de 2 años y su respectiva altura de escurrimiento

Escenario Inalterado (T= 5 años)						
Caudal [m3/s]	1973	1975.9	1994.1	1999.3	1993.3	1984.5
Altura [m]	5.62	5.62	5.66	5.67	5.66	5.64

Tabla A.4: Caudales inalterados con periodo de retorno de 5 años y su respectiva altura de escurrimiento

Escenario Inalterado (T=10 años)						
Caudal [m3/s]	3892	3894.9	3913.1	3918.3	3912.3	3903.5
Altura [m]	9.40	9.40	9.44	9.45	9.44	9.42

Tabla A.5: Caudales inalterados con periodo de retorno de 10 años y su respectiva altura de escurrimiento

Escenario Alterado (T= 2 años)						
Caudal [m3/s]	504.6	540.2	568	549	520.7	498
Altura [m]	2.72	2.79	2.85	2.81	2.75	2.71

Tabla A.5: Caudales alterados con periodo de retorno de 2 años y su respectiva altura de escurrimiento

Escenario Alterado (T= 5 años)						
Caudal [m3/s]	2003.6	2039.2	2067	2048	2019.7	1997
Altura [m]	5.68	5.75	5.80	5.76	5.71	5.66

Tabla A.5: Caudales alterados con periodo de retorno de 5 años y su respectiva altura de escurrimiento

Escenario Alterado (T= 10 años)						
Caudal [m3/s]	3922.6	3958.2	3986	3967	3938.7	3916
Altura [m]	9.46	9.53	9.58	9.55	9.49	9.45

Tabla A.5: Caudales alterados con periodo de retorno de 10 años y su respectiva altura de escurrimiento