



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

**IMPACTO DE INCENDIOS FORESTALES EN LOS PROCESOS
HIDROLÓGICOS CONSIDERANDO LA VARIACIÓN TEMPORAL Y
ESPACIAL DE LA COBERTURA VEGETAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

MAXIMILIANO ANDRES HEBEL NEIRA

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EDUARDO RUBIO ÁLVAREZ
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA
JAVIER CEPEDA ABAD

SANTIAGO DE CHILE
2019

**IMPACTO DE INCENDIOS FORESTALES EN LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS
CONSIDERANDO LA VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA COBERTURA
VEGETAL**

En los últimos años, extensas áreas de Chile se han visto afectadas por incendios forestales, lo cual puede llegar a generar cambios en las características de la escorrentía y procesos hidrológicos que se presentan en una cuenca.

Este estudio se llevó a cabo en la cuenca del Río Malleco en Collipulli, donde en la parte superior de la cuenca se encuentra ubicado el Parque Nacional Tolhuaca. Se trata de un lugar apropiado para esta investigación, debido a que fue afectado por un incendio forestal el año 2002 y nuevamente el año 2015. Se considero de importancia estudiar la disponibilidad del recurso hídrico en la zona, debido a que este constituye un elemento fundamental para el desarrollo de labores de restauración ecológica.

El trabajo se basó en la aplicación de productos satelitales para cuantificar los efectos del incendio forestal sobre la vegetación y la caracterización de la conductividad hidráulica mediante ensayos en la zona afectada. Se estudiaron las variables hidrológicas que se modificaron en este evento, estas fueron afectadas debido al cambio del uso de suelo, generando cambios principalmente en la evapotranspiración, abstracción e infiltración. La evaluación de estas variables en el tiempo se realizó mediante el análisis de imágenes satelitales multiespectrales y productos satelitales, los cuales permiten cuantificar el área y estado de la vegetación presente en la zona de estudio. La información se clasifico en 6 grupos los cuales fueron implementados en el modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC), el que fue calibrado en base al criterio de eficiencia Kling-Gupta (KGE) de los caudales medios diarios. Este estudio se desarrolla entre el año 2002 a 2015, corresponde a un periodo de 13 años periodo importante para la recuperación del bosque.

Finalmente se obtuvo la evolución de los hidrogramas y variables de salida en el periodo de recuperación del bosque. Los resultados de las distintas modelaciones evidenciaron que existe un comportamiento muy similar entre ellas en términos de los coeficientes KGE y NSE. Por otra parte, se comprobó que existe una mejora de 1% al 3% en términos de indicadores hidrológicos en las modelaciones que consideran el efecto del incendio en la vegetación.

Agradecimientos

Me gustaría comenzar agradeciéndole a mis profesores en este largo camino para obtener el título de ingeniero civil, especialmente a mi profesora guía. Por la gran calidad humana, perseverancia y excelencia inculcada.

A mi familia por el apoyo incondicional, en los momentos buenos y sobre todo en los difíciles.

A mis amigos de la vida por los bonitos momentos que hemos compartido y por los que vendrán.

A mi pareja por estar a mi lado en todo momento, tranquilizarme y repetirme incontables veces que si se puede.

A mis compañeros de la pecera, que siempre estuvieron ahí para sacar más de una sonrisa y tranquilizar cuando uno más lo necesitaba.

A Eridanus por facilitarme el Permeámetro de Guelph y permitirme llevármelo hasta el Parque Nacional Tolhuaca para realizar las mediciones.

A mi compañero de terreno, Claudio Ávila. Por tener la mejor disposición de acompañarme al terreno y siempre con alegría a pesar del cansancio, frío y comida de campamento.

A Conaf y los guardaparques del Parque Nacional Tolhuaca, por permitirme llevar a cabo las mediciones en terreno y por su apoyo los días de terreno.

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1	: INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	<i>General</i>	2
1.2.2	<i>Específicos</i>	2
1.3	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	2
CAPÍTULO 2	: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	FUEGO EN BOSQUES NATIVOS	3
2.1.1	<i>Causas, factores y consecuencias de los incendios forestales</i>	3
2.1.2	<i>Vegetación en la zona de estudio y restauración ecológica</i>	4
2.1.3	<i>Severidad de un incendio</i>	5
2.2	MODELOS HIDROLÓGICOS	6
2.2.1	<i>Modelo VIC</i>	7
2.2.2	<i>Experiencia nacional con el modelo VIC y productos meteorológicos desarrollados</i>	11
2.3	EFFECTO DEL FUEGO EN LA HIDROLOGÍA	13
2.3.1	<i>Cambios en la escorrentía</i>	14
2.3.2	<i>Tendencia espacial y temporal de la evapotranspiración posterior a un incendio forestal</i>	14
CAPÍTULO 3	: ZONA DE ESTUDIO	16
3.1	DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO SELECCIONADA	16
3.2	INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DISPONIBLE	20
3.2.1	<i>Información fluviométrica</i>	20
3.2.2	<i>Información Pluviométrica</i>	21
4.1	OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA DE COBERTURA VEGETAL	22
4.1.1	<i>Severidad de Quemado</i>	22

4.1.2	<i>Cobertura vegetal</i>	23
4.2	ANÁLISIS INFILTRACIÓN	23
4.3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO VIC	24
4.3.1	<i>Parámetros generales VIC</i>	24
4.3.2	<i>Archivos de vegetación</i>	25
4.3.3	<i>Parámetros de suelo</i>	28
4.3.4	<i>Variables forzantes</i>	29
4.3.5	<i>Kling-Gupta Efficiency(KGE)</i>	29
4.3.6	<i>ShuffledComplexEvolution (SCE)</i>	31
4.3.7	<i>Parámetros a calibrar</i>	32
4.4	METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
4.4.1	<i>Indicadores hidrológicos</i>	33
4.4.2	<i>Curva de duración</i>	34
CAPÍTULO 5	: RESULTADOS	34
5.1	VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL	34
5.1.1	<i>Severidad de quemado</i>	35
5.1.2	<i>Cobertura Vegetal</i>	36
5.2	MEDICIONES DE INFILTRACIÓN	40
5.3	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	43
5.3.1	<i>Caudales medios diarios</i>	43
5.3.1.1	Ajuste de las modelaciones según indicadores KGE y NSE.....	43
5.3.1.2	Comparación de caudal observado y simulado.....	44
5.3.2	<i>Caudales medios mensuales</i>	45
5.3.2.1	Caudal observado versus modelado.....	45
5.3.2.2	Curvas de variación estacional	46
5.3.2.3	Curvas de duración	48

5.3.3	<i>Balance hídrico</i>	49
5.3.4	<i>Indicadores hidrológicos</i>	49
5.3.5	<i>Distribución espacial de flujos</i>	51
5.3.5.1	Evaporación total.....	51
5.3.5.2	Escorrentía directa.....	54
5.3.5.3	Cobertura nival.....	56
5.3.5.4	Equivalente de nieve en agua (SWE).....	58
5.3.6	<i>Variación de parámetros calibrados</i>	60
CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES		62
6.1	CONCLUSIONES.....	62
6.2	COMENTARIOS FINALES.....	64
6.2.1	<i>Análisis Geoespacial</i>	64
6.2.2	<i>Mediciones de infiltración</i>	64
6.2.3	<i>Modelación Hidrológica</i>	65
BIBLIOGRAFÍA		66
ANEXO A		69
ANEXO B		75
ANEXO C		89
ANEXO D		93

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Severidad de quemado según valor de coeficiente dNBR(CONAF, 2017; Key & Benson, 2006).....	6
Tabla 2-2 Principales flujos hidrológicos en la cuenca de interés. Valores obtenidos entre 1/04/1985 y 31/03/2015(Vargas et al., 2018).....	13
Tabla 3-1 Disponibilidad de información fluviométrica y satelital para cuencas evaluadas....	16
Tabla 3-2 Parámetros geomorfológicos generales de la zona de estudio	17
Tabla 3-3 Distribución usos de suelo en la cuenca.....	19
Tabla 3-4 Área afectada por los incendios del año 2002 y 2015 según sus severidades.....	19
Tabla 3-5 Estación fluviométrica a la salida de la cuenca Río Malleco en Collipulli.....	20
Tabla 3-6 Estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio.....	21
Tabla 4-1 Tipo de sensor y espacio temporal utilizado	22
Tabla 4-2 Flujos de salida del modelo	25
Tabla 4-3 Tramos temporales de validación y calibración	25
Tabla 4-4 Tipos de vegetación disponibles en la librería vegetación VIC	26
Tabla 4-5 Variables del archivo parámetros de vegetación.....	27
Tabla 4-6 Variables del archivo librería de vegetación	27
Tabla 4-7 Parámetros de suelo(Ulloa Duarte, 2012)	28
Tabla 4-8 Parametros a calibrar con SCE.....	32
Tabla 4-9 Indicadores Hidrológicos	33
Tabla 5-1 Conductividad hidráulica de puntos muestreados	41
Tabla 5-2 Conductividad hidráulica saturada y severidad de quemado de cada punto muestreado	42

Tabla 5-3 Balance hídrico y almacenamiento asociado. Valores obtenidos entre 01/04/2002 y 31/03/2014.....	49
Tabla 5-4 Evaporación total normalizada por la precipitación por la fracción de cada pixel, promedio para toda la cuenca	52
Tabla 5-5 Escorrentía normalizada por la precipitación y por la fracción de cada pixel, promedio para toda la cuenca	55

Índice de Figuras

Figura 2-1 Incendios forestales por periodos históricos (González & Veblen, 2007). Líneas verticales indican la cantidad de incendios forestales en los dos periodos analizados.....	4
Figura 2-2 Distribución bosque andino patagónico (Salvatierra et al.2010)	4
Figura 2-3 Taxonomía de modelos hidrológicos (Hrachowitz& Clark, 2017). Los números representan modelos hidrológicos: 1: Hidrograma unitario; 2: HBV; 3: SUPERFLEX ; 4: FLEX-Topo; 5: mhM; 6: mhM-topo; 7: SWAT; 8: NWS-Sacramento; 9: GR4J; 10: HYPE; 11: VIC; 12: TOPMODEL; 13: CRHM; 14: TACD; 15: WASIM-ETH; 16: DHSVM; 17: MIKE-SHE; 18: PARFLOW; 19: CATFLOW; 20: HYDRUS-3D; 21: CATHY; 22: HydroGeoSphere; 23: PIHM	6
Figura 2-4 Diagrama de funcionamiento modelo VIC (Gao et al., 2009)	7
Figura 2-5 Diagrama de generación de escurrimiento (Maurer, 2011)	8
Figura 2-6Aproximaciónfísica de Penman Monteith (Maurer, 2011)	8
Figura 2-7 Estratos de suelo (Ulloa Duarte, 2012)	9
Figura 2-8 Curva de infiltración variable(Gao et al., 2009)	9
Figura 2-9 Simulación de nieve en VIC(Gao et al., 2009)	10
Figura 2-10 Porcentaje de nieve según temperatura	11
Figura 2-11 Evolución del manto(Gao et al., 2009)	11
Figura 2-12 Observaciones de precipitación izquierda, producto grillado CR2met izquierda. Fuente: www.cr2.cl	12
Figura 2-13Comparación de la media de 5 años del hidrograma anual de dos cuencas no quemadas (StarCk. Y North York Ck.) y dos quemadas (South York Ck. y Lynx Ck.)(Mahat et al., 2016).....	14
Figura 2-14 Comparación entre SSEBop ET y observaciones en terreno, para un terreno compuesto por a) conífera mixta y b) Pino(Poon& Kinoshita, 2018)	15
Figura 2-15 Promedio espacial de la precipitación y ET anual (mm/año) para todas las cuencas (según el ID de la cuenca)(Poon& Kinoshita, 2018).....	15
Figura 3-1 Topografía y ubicación zona de estudio	17

Figura 3-2 Curva hipsométrica zona de estudio	18
Figura 3-3 Catastro uso de suelo y vegetación, fuente: www.ide.cl.....	18
Figura 3-4 Sub-usos del bosque.....	19
Figura 3-5 Coeficiente de escorrentía, 10 años anteriores y 10 años posteriores al incendio forestal del año 2002.....	20
Figura 3-6 Red Hidrometeorológica y de drenaje	21
Figura 4-1 Metodología de las modelaciones a realizar	24
Figura 4-2 Cobertura de suelo zona de estudio.....	26
Figura 4-3 Frente de Pareto tridimensional de r , α y β . ED es la distancia Euclidiana entre el punto óptimo y el punto ideal (Gupta et al., 2009).....	30
Figura 4-4 Esquema de funcionamiento SCE(Duan, Soroosh, & Gupta, 1992)	32
Figura 5-1 Mapa de severidad de quemado post incendio forestal, año 2003.....	35
Figura 5-2 Variabilidad interanual de severidad de quemado	36
Figura 5-3 Cobertura vegetal post incendio, LAI 2003	37
Figura 5-4 Cobertura vegetal según el indicador LAI en máximo estado de recuperación, enero 2015	38
Figura 5-5 Cobertura vegetal según el indicador LAI post incendio forestal, marzo 2015.....	38
Figura 5-6 Promedio anual del indicador LAI, 2001-2017	39
Figura 5-7 Variación mensual indicador LAI, caso previo incendio (2001) y caso posterior incendio (2002 y 2015).....	40
Figura 5-8 Sitios de pruebas de infiltración planificadas y muestreadas.....	41
Figura 5-9 Conductividad hidráulica según severidad de quemado y aproximaciones para caracterizar la totalidad de la zona de estudio	42
Figura 5-10 Rendimiento modelaciones en periodo de calibración y validación.....	43
Figura 5-11 Caudal Observado versus modelado escala diaria	44

Figura 5-12 Serie diaria de caudales, periodo de calibración (superior) y validación (inferior)	45
Figura 5-13 Comparación de caudal medio mensual observado y modelado	46
Figura 5-14 Curvas variación estacional periodo de calibración y validación	47
Figura 5-15 Curva de duración para los periodos de calibración y validación.....	48
Figura 5-16 Rendimiento modelaciones según indicadores hidrológicos, periodo de calibración	50
Figura 5-17 Rendimiento modelaciones según indicadores hidrológicos, periodo de validación	50
Figura 5-18 Evapotranspiración total normalizada por la precipitación [-].....	51
Figura 5-19 Diferencia porcentual de la evaporación normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI variable en el tiempo (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal.	53
Figura 5-20 Escorrentía directa normalizada por la precipitación [-].....	54
Figura 5-21 Diferencia porcentual de la escorrentía normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI como forzante (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal	55
Figura 5-22 Cobertura nival normalizada por la precipitación [-].....	56
Figura 5-23 Diferencia porcentual de la cobertura nival normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI como forzante (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración	

utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal. 57

Figura 5-24 SWE normalizado por la precipitación [-] 58

Figura 5-25 Diferencia porcentual de SWE normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI como forzante (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal. 59

Figura 5-26 Variación de parámetros calibrados 60

Figura 5-27 Continuación, variación de parámetros calibrados 61

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

En Chile, se ha generado un aumento de los incendios forestales en los últimos años, especialmente durante los meses de verano (CONAF, 2017). Estos hechos forman parte de la historia de la IX Región de la Araucanía (Urrutia de Hazbun, 1993), produciendo pérdidas materiales en las poblaciones cercanas y un daño significativo a la biodiversidad del país.

Esta temática ha sido abordada por diversas disciplinas, con el objetivo de comprender el efecto en el recurso hídrico que tienen estos eventos. Uno de los estudios aborda el tratamiento que se hace necesario aplicar al agua potable posterior a un incendio forestal (Hohner, 2016). Otra investigación corresponde a la aceleración de la erosión que se produce posterior a un incendio forestal y sus efectos en la escorrentía (Prosser & Williams, 1998).

Considerando el impacto que tienen estos eventos en la escorrentía y procesos hidrológicos de las cuencas, se ha considerado de interés el análisis de la evolución de un sistema afectado por un incendio en alguna etapa reciente y que se encuentre en proceso de recuperación de manera de validar a través de un modelo de simulación hidrológica, que utilice imágenes satelitales de la cobertura vegetal.

En la actualidad, es necesario generar estudios de estas características, debido a lo recurrente de estos eventos y la gran extensión de terreno que han abarcado en los últimos años. Los eventos registrados anteriormente en algunas cuencas del país tienen gran valor para este estudio ya que, por medio de información de estaciones fluviométricas e imágenes satelitales, permiten la modelación de la cuenca afectada, teniendo en cuenta el área incendiada, la evolución de la cobertura vegetal y la temperatura del suelo, entre otras variables.

Un sistema que reúne los criterios previamente señalados corresponde a la cuenca del Río Malleco ubicada en la Región de la Araucanía. Esta fue afectada por un incendio forestal en febrero del 2002, destruyendo un área de 104 kilómetros cuadrados, damnificando el Parque Nacional Tolhuaca que se encuentra ubicado en la parte alta de la cuenca. El año 2015 se generó un nuevo incendio forestal que dañó un área muy similar a la del año 2002. Estos eventos hacen que la zona de estudio sea ideal para la realización de esta investigación, ya que durante los 13 años posteriores a los incendios es posible detectar una recuperación del bosque.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Determinar el impacto de los incendios forestales en los procesos hidrológicos, considerando la variación temporal y espacial de la cobertura vegetal en una cuenca definida por la estación fluviométrica Rio Malleco en Collipulli.

1.2.2 Específicos

- Identificar una cuenca que cumpla con los requisitos necesarios para evaluar temporal y espacialmente el efecto de los incendios forestales sobre la vegetación.
- Identificar variables hidrológicas simuladas por un modelo distribuido, que son afectadas por los incendios forestales y su impacto en el escurrimiento.
- Definir indicadores que representen el impacto que genera el aumento de la cobertura vegetal en las variables hidrológicas y en el escurrimiento.
- Identificar que configuración y variables de entrada deben ser consideradas para la obtención de una modelación hidrológica más eficiente.

1.3 Organización del documento

En el Capítulo 2 se presenta la revisión bibliográfica abordando variados temas como: causa y efectos que tienen los incendios forestales, la recuperación del bosque en la zona de estudio y la evaluación del daño producto del incendio. Luego se expone el funcionamiento del modelo utilizado en este estudio, contemplando la función objetivo y el mecanismo de calibración. Finalmente, se resumen las principales investigaciones en el área de la hidrología en el ámbito de los incendios forestales.

En el Capítulo 3 se presenta la zona de estudio, mostrando las características generales del lugar como topografía y usos de suelo. Luego se expone la disponibilidad de información hidro meteorológica.

En el Capítulo 4 se presenta la metodología de muestreo y análisis de las variables de entrada del modelo, además de la implementación de las modelaciones realizadas

En el Capítulo 5 se presentan los resultados del análisis geoespacial, mediciones en terreno realizadas y se exponen y discuten los resultados de las modelaciones realizadas.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y comentarios finales acerca de las metodologías aplicadas y sus resultados

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

2.1 Fuego en bosques nativos

2.1.1 Causas, factores y consecuencias de los incendios forestales

Los incendios forestales representan una causa significativa de pérdida del patrimonio nacional. Anualmente, se queman entre 20.000 y 85.000 hectáreas de vegetación, afectando principalmente vegetación natural (Fernández et al., 2010). Si bien el fuego forma parte de la dinámica natural de algunos hábitats, las perturbaciones de gran magnitud provocan un detrimento de las funcionalidades de los ecosistemas. El fuego modifica los ciclos biogeoquímicos, produce cambios en la vegetación, suelo, fauna, procesos hidrológicos y geomorfológicos, calidad de las aguas e incluso cambios en la composición de la atmósfera. Por otra parte, estos eventos tienen múltiples factores que los conforman: biomasa disponible, intensidad (temperaturas alcanzadas y duración), área quemada, tiempo desde el último incendio, tipo de suelo, humedad, pendiente y vegetación (CONAF, 2017).

Si bien sus efectos son principalmente destructivos, éstos también ayudan a la regeneración del bosque y otros ecosistemas. Un fuego de baja intensidad puede limpiar matorrales que se acumulan peligrosamente, previniendo un incendio forestal catastrófico. Adicionalmente, facilitan la germinación de semillas de especies que requieren de calor como medio para romper la latencia (Andrzej et al., 2008). Sin embargo, la actividad antrópica ha alterado dramáticamente la frecuencia y severidad de los incendios, especialmente posterior a 1880. Anterior al desarrollo de las sociedades humanas, el fuego se producía por rayos, especialmente en periodos secos. Esto queda de manifiesto en la Figura 2-1, donde se diferencia el periodo pre y post colonización. Actualmente, la principal causa de los incendios forestales corresponde a la actividad humana. Estos son producidos debido a la necesidad de desforestar para utilizar las tierras con fines agrícolas-ganaderos. Otro importante motivo corresponde a la quema de residuos agrícolas (González & Veblen, 2007).

En la Figura 2-1 se puede observar cómo los incendios han aumentado su frecuencia a partir de la década del 90, marcando una tendencia al alza que se ha agudizado en el último siglo.

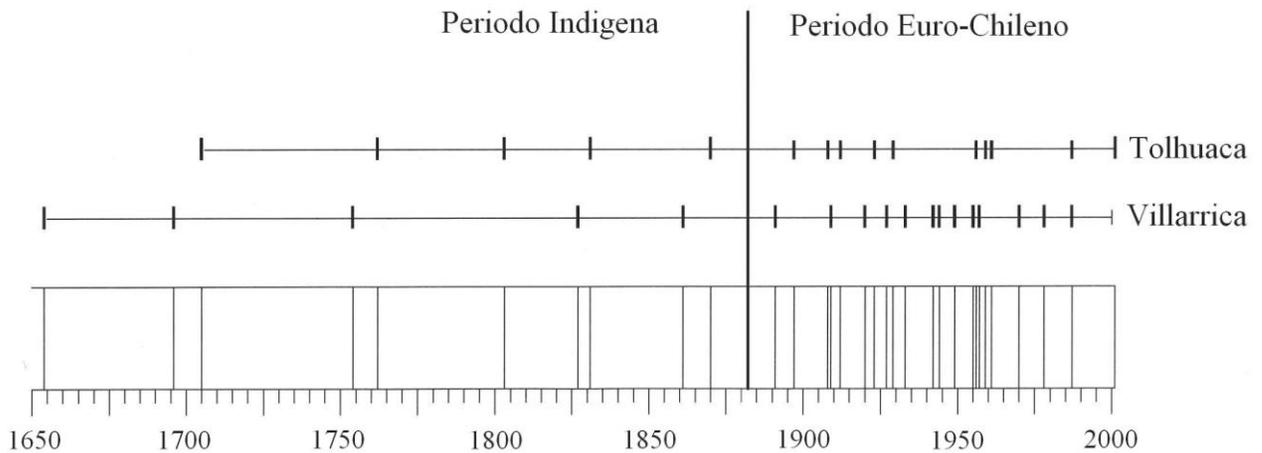


Figura 2-1 Incendios forestales por periodos históricos (González & Veblen, 2007). Líneas verticales indican la cantidad de incendios forestales en los dos periodos analizados.

2.1.2 Vegetación Parque Nacional Tolhuaca y restauración ecológica

La vegetación presente en el Parque Nacional Tolhuaca se clasifica como un bosque andino patagónico (Fernández et al., 2010). Este se encuentra fuertemente influenciado por la variabilidad climática interanual, ya que años de mayor actividad de incendios forestales están usualmente asociados a un invierno seco y verano cálido (Veblen et al., 1999). Según la clasificación de (Gajardo Michell, 1995), esta región se divide en dos subregiones (Figura 2-2):

- Cordilleras de la Araucanía
- Cordilleras Patagónicas

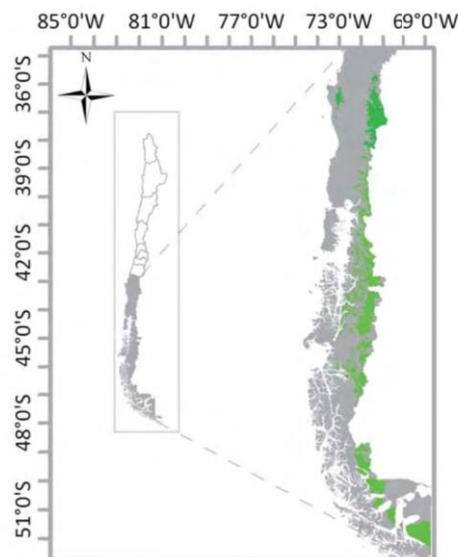


Figura 2-2 Distribución bosque andino patagónico (Salvatierra et al.2010)

Según esta clasificación, la zona de estudio se encuentra ubicada en la subregión de las cordilleras de la Araucanía. La especie arbórea que domina el paisaje es *Araucaria araucana*, pero se encuentra asociada con otras especies (Fernández et al., 2010). *Araucaria araucana* se encuentra en rodales puros con escaso sotobosque o en rodales mixtos donde comúnmente están presentes especies del género *Nothofagus* (Ñirre, Lenga y Coigüe)(T. T. Veblen, 1982). *A. araucana* se encuentra adaptada al fuego, ya que posee yemas terminales protegidas y una gruesa corteza resistente al fuego que se desarrolla en distintivas placas poligonales (T. Veblen et al., 1995). En cambio, el Coigüe y la Lenga son muy sensibles al fuego, a diferencia del Ñirre que tras un incendio forestal brota inmediatamente, establece dominancia por alrededor de 70 años, tras lo cual *A. araucana*, creciendo a semi sombra, lo sobrepasa y comienza a crecer más rápidamente; pasados alrededor de 150 años, *A. araucana* podría desplazar a la especie Ñirre, debido a que se produciría competencia entre ellas (T. Veblen et al., 1995)

González y Veblen (2007) estudiaron la recuperación del bosque posterior al incendio ocurrido el año 2002 en la cordillera andina de las provincias de Malleco y Cautin. Afirman que las áreas afectadas fueron rápidamente colonizadas, siendo *Chusquea culeou* (colihue) la especie que colonizó más rápida y densamente. Los autores concluyen que los bosques dominados por los *Nothofagus* y *Araucaria*, son capaces de recuperarse natural y favorablemente después de un incendio. Sin embargo, esta recuperación se ve afectada negativamente por la extracción de árboles muertos y la presencia de ganado. Esta última genera la proliferación de especies exóticas o matorrales de arbustos espinosos en el lugar, impidiendo localmente la regeneración de especies leñosas(González & Veblen, 2007).

2.1.3 Severidad de un incendio

El interés por clasificar la severidad de quemado en un área en particular, se debe a la designación de tareas para lograr la restauración futura, ya que frecuentemente la regeneración post-fuego está vinculada con la severidad del incendio (Bran et al. 2007).

La severidad de un incendio forestal se define como el efecto que tiene el fuego sobre un ecosistema determinado; efectos tanto físicos, químicos y biológicos (Wagtendonk et al., 2006). Los niveles de severidad se clasifican en: baja, moderada y alta; y representa la suma de todos los estratos del ecosistema (DeBano et al., 1998). En un ecosistema forestal, los estratos se componen por suelo, combustible de superficie, capa herbácea, arbustos del sotobosque, árboles intermedios y arboles dominantes y co-dominantes (Brown&Smith 2000).

La severidad de quemado es posible de cuantificar por el índice *Difference Normalized Burn Ratio* (dNBR) (ecuaciones 2.1 y 2.2). Este índice se basa en el análisis de una imagen previa y posterior al incendio, permitiendo captar cambios en la estructura de la vegetación y reflectividad del suelo (CONAF, 2017). El resultado es interpretado según lo propuesto por Key & Benson (2006) y que se resume en la Tabla 2-1.

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

$$dNBR = NBR_{pre-incendio} - NBR_{post-incendio} \quad (2.2)$$

Donde:

NIR: Banda infrarroja cercana

SWIR: Banda infrarroja de onda corta

Tabla 2-1 Severidad de quemado según valor de coeficiente dNBR (CONAF, 2017; Key & Benson, 2006)

Valores del dNBR	Severidad del daño
< -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

2.2 Modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico corresponde a un sistema diseñado para descubrir los mecanismos del flujo y conseguir una descripción física y matemática de los procesos que los dominan (Freeze & Harlan, 1969).

Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados según lo expuesto en la Figura 2-3, diferenciándolos por complejidad de los procesos, resolución espacial y manejo de información (discreto o continuo).

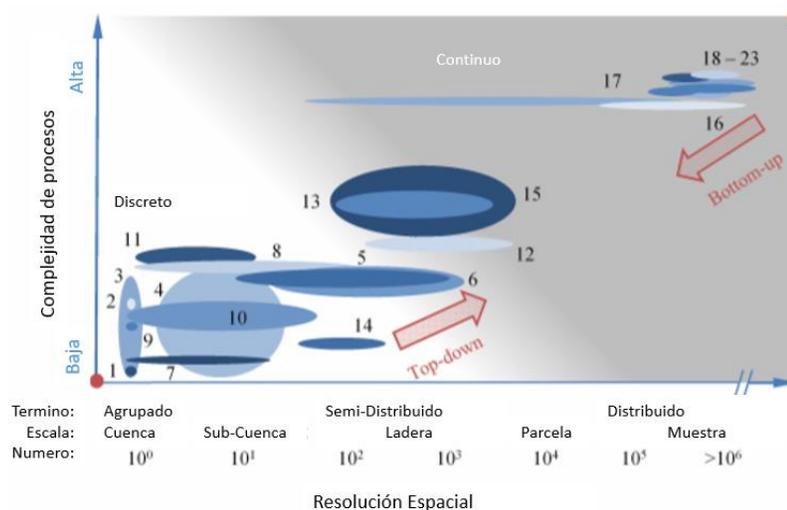


Figura 2-3 Taxonomía de modelos hidrológicos (Hrachowitz & Clark, 2017). Los números representan modelos hidrológicos: 1: Hidrograma unitario; 2: HBV; 3: SUPERFLEX; 4: FLEX-Topo; 5: mhM; 6: mhM-topo; 7: SWAT; 8: NWS-Sacramento; 9: GR4J; 10: HYPE; 11: VIC; 12: TOPMODEL; 13: CRHM; 14: TACD; 15: WASIM-ETH; 16: DHSVM; 17: MIKE-SHE; 18: PARFLOW; 19: CATFLOW; 20: HYDRUS-3D; 21: CATHY; 22: HydroGeoSphere; 23: PIHM

2.2.1 Modelo VIC

Variable Infiltration Capacity VIC (Liang, 1994) corresponde a un modelo hidrológico distribuido, que resuelve balances hídricos y de energía

La unidad de trabajo básica del modelo se denomina celda (Figura 2-4), esta puede ser comparada con una unidad de respuesta hidrológica, ya que VIC requiere la independencia de flujos entre cada unidad.

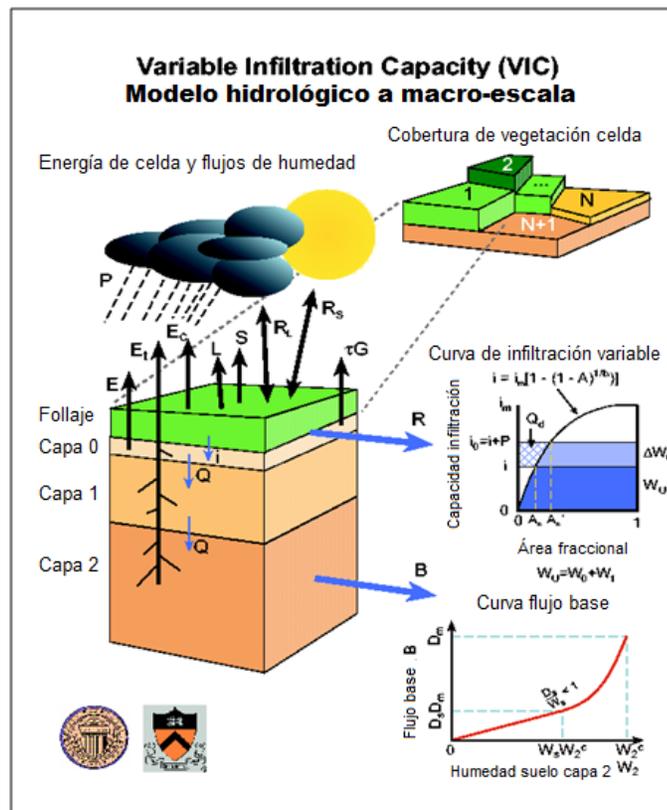


Figura 2-4 Diagrama de funcionamiento modelo VIC (Gao et al., 2009)

Algunos de los supuestos de este modelo son, que existe independencia de las celdas en la fase del balance de más, lo cual conlleva a que los flujos horizontales son ignorados frente a los verticales. Adicionalmente considera que el flujo subterráneo es despreciable con respecto al superficial, mientras que los flujos subsuperficiales, tales como el proveniente de lagos y humedales no se consideran significativos a los canales, y las inundaciones en planicies tampoco son consideradas.

Los parámetros de vegetación y suelo son definidos según la zona de estudio y son fijos durante el tiempo. Además de esto las forzantes del modelo corresponden a variables meteorológicas que son entregados con un paso de tiempo previamente definido y representan las variables, como la precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad, radiación entre otras.

El escurrimiento adicional se genera cuando la capacidad de almacenamiento es superada en un paso de tiempo, esto es ejemplificado en la Figura 2-5.

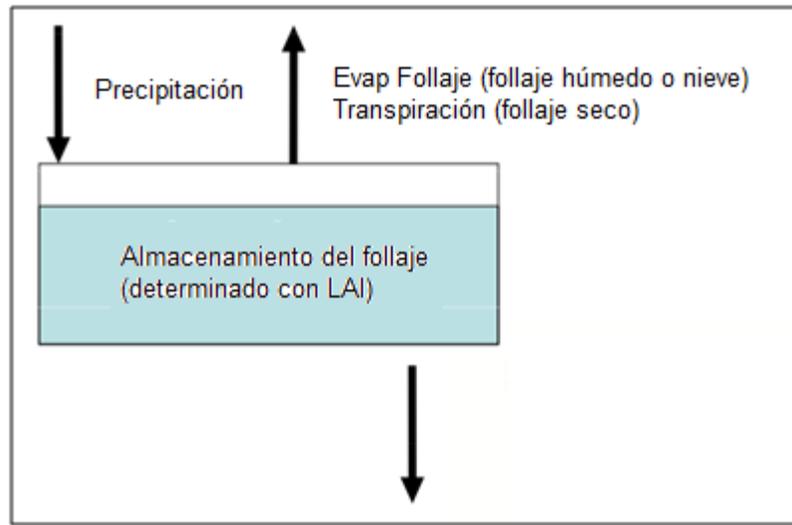


Figura 2-5 Diagrama de generación de escurrimiento (Maurer, 2011)

La evapotranspiración en VIC se compone de tres variables, estos son la evaporación de la cubierta húmeda, la transpiración de la cubierta seca y la evaporación el suelo de cubierta desnuda. La aproximación física de Penman Monteith es utilizada para la estimación de la evaporación húmeda y la transpiración de la vegetación seca, de acuerdo con lo señalado en la Figura 2-6. El modelo considera un almacenamiento en la vegetación que viene determinado por el índice de área foliar (LAI), la liberación del volumen de agua se realiza cuando la precipitación (sólida o líquida) excede este límite.

$$E_p = \frac{s(R_n - G) + \rho c_p d_a / r_a}{s + \gamma(1 + r_s / r_a)}$$

Diagrama de la ecuación de Penman Monteith con explicaciones de los términos:

- El término $s(R_n - G)$ es el término de radiación neta, función de la radiación solar entrante (nubosidad).
- El término $\rho c_p d_a / r_a$ es el término de déficit de presión de vapor, función de la humedad y temperatura del aire, con resistencia aerodinámica (velocidad de viento y rugosidad de superficie).
- El denominador $s + \gamma(1 + r_s / r_a)$ está asociado con los términos de resistencia del follaje y resistencia aerodinámica.

Figura 2-6 Aproximación física de Penman Monteith (Maurer, 2011)

El modelo considera típicamente 3 estratos de suelo, los cuales están relacionados a distintos procesos hidrológicos como se expone en la Figura 2-7 a continuación.

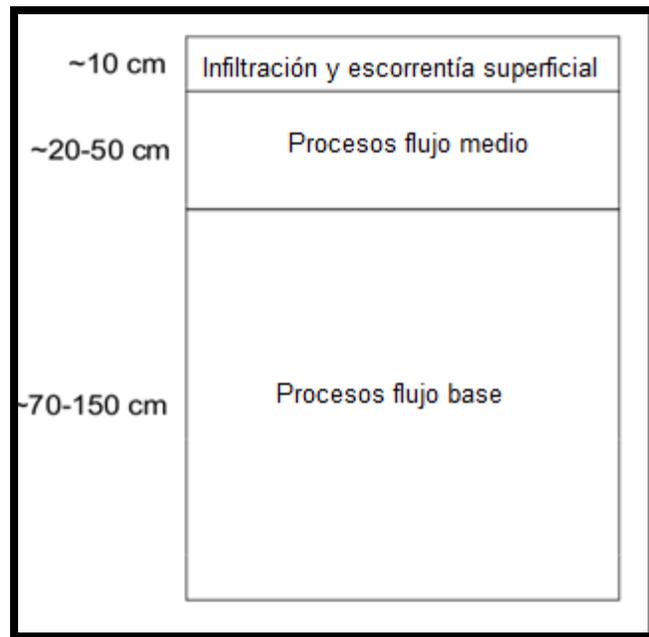


Figura 2-7 Estratos de suelo (Ulloa Duarte, 2012)

La escorrentía directa producto de la infiltración en el suelo viene dada por una función no lineal que es definida por el coeficiente b_{inf} , que describe la capacidad de infiltración disponible en función de saturación relativa del área. Es decir, un alto valor de b_{inf} entrega bajos valores de infiltración y altos valores de escorrentía. Esto se ejemplifica en la Figura 2-8.

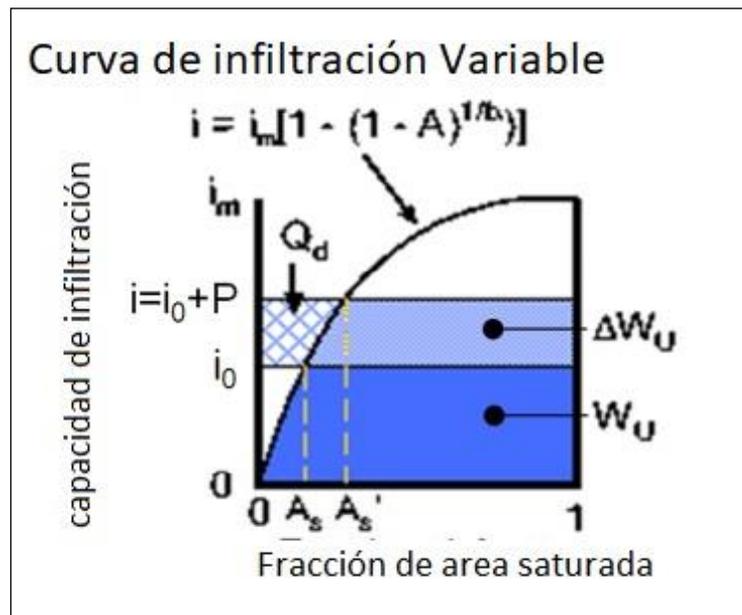


Figura 2-8 Curva de infiltración variable (Gao et al., 2009)

Para la modelación de la nieve se utilizan dos capas para realizar el balance de energía, una delgada capa en la superficie y otra en el manto de nieve. Así modela la acumulación y derretimiento. El agua puede ser incluida como precipitación, nieve o agua proveniente de la vegetación. Esto incluye radiación de onda corta, onda larga, calor latente y energía convectiva. Esto es ejemplificado en la Figura 2-9.

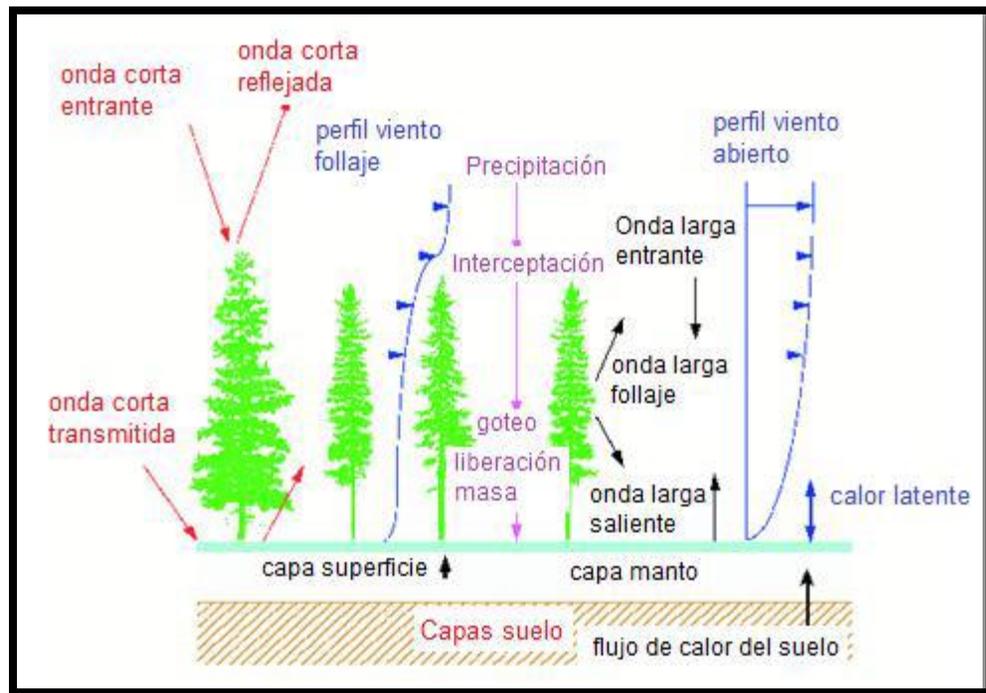


Figura 2-9 Simulación de nieve en VIC(Gao et al., 2009)

El modelo realiza una separación muy simple para determinar la forma (sólida o líquida) de precipitación. Esto se realiza con una interpolación lineal entre la temperatura máxima que se genera nieve (2°C) y la mínima donde se presenta lluvia (0°C), estos valores en la práctica fueron calibrados por lo que se puede generar diferencias al momento de presentar los resultados. Los porcentajes de precipitación sólida siguiendo este principio, se presentan en la Figura 2-10.

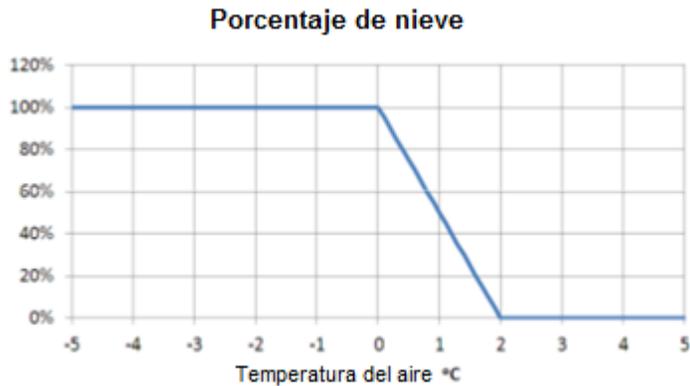


Figura 2-10 Porcentaje de nieve según temperatura

La acumulación de nieve se realiza con un algoritmo recursivo que consiste en ir generando capas de nieve comprimida a medida que se ingresa nieve nueva al sistema. Adicionalmente el albedo disminuye a medida que aumenta la edad de la nieve (Figura 2-11).

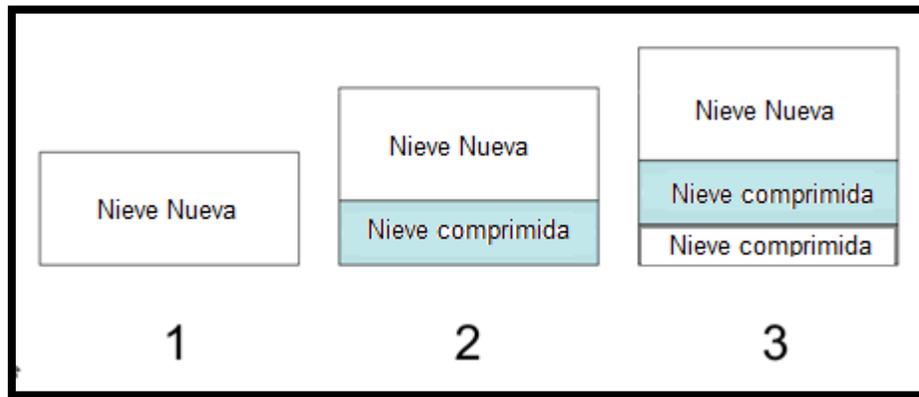


Figura 2-11 Evolución del manto (Gao et al., 2009)

2.2.2 Experiencia nacional con el modelo VIC y productos meteorológicos desarrollados

La Dirección General de Aguas (DGA) se encuentra llevando a cabo la actualización del balance hídrico nacional desde el año 2016. La tercera etapa de este proyecto se encuentra a cargo de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Esta etapa tiene como objetivo la modelación de las cuencas de la macrozona sur y parte norte de la macrozona austral del país.

La primera fase de este proyecto consideró el desarrollo de una metodología que permitiera la estimación del balance hídrico a escala de cuenca, en función del nivel, calidad y extensión de los datos hidrometeorológicos y climáticos disponibles. Esta fue utilizada inicialmente en 5 cuencas piloto, correspondientes a los ríos Loa, Choapa, Maipo, Imperial y Aysén. Posteriormente se extendió al resto de las cuencas. (Vargas et al., 2017)

En la metodología de este proyecto se considera la utilización de modelo VIC (Variable Infiltration Capacity). Como resultados del modelo son exportadas las principales variables de flujo y almacenamiento en series temporales diarias. Con estos resultados se elaboran coberturas y mapas de escorrentía, evapotranspiración, precipitación y temperatura media anual promedio en el periodo 1985-2015. Estos resultados son comparados con el Balance Hídrico existente (DGA, 1987).

En este contexto se desarrollaron productos meteorológicos con el objetivo de realizar las modelaciones de las cuencas del territorio nacional. Estas variables fueron utilizadas de forma íntegra en este estudio para la realización de los experimentos numéricos.

“La técnica utilizada para la construcción del producto de precipitación se basa en una regionalización estadística de datos del reanálisis atmosférico ERA5 (datos disponibles en grillas de ~25 km). El método utiliza modelos estadísticos como funciones de transferencia para traducir precipitación, flujos de humedad y otras variables de gran escala de ERA5, en precipitación regional. Los modelos estadísticos consideran la topografía local y se definen mediante un conjunto de parámetros calibrados con observaciones locales de precipitación.”CR2 (2017)

“Los productos de temperatura se construyeron con un enfoque relativamente distinto. En este caso, además de la información local (topografía y observaciones de temperatura) y de variables de gran escala (ERA5), se consideraron datos de temperatura superficial estimada mediante imágenes satelitales (MODIS LST).” CR2 (2017)

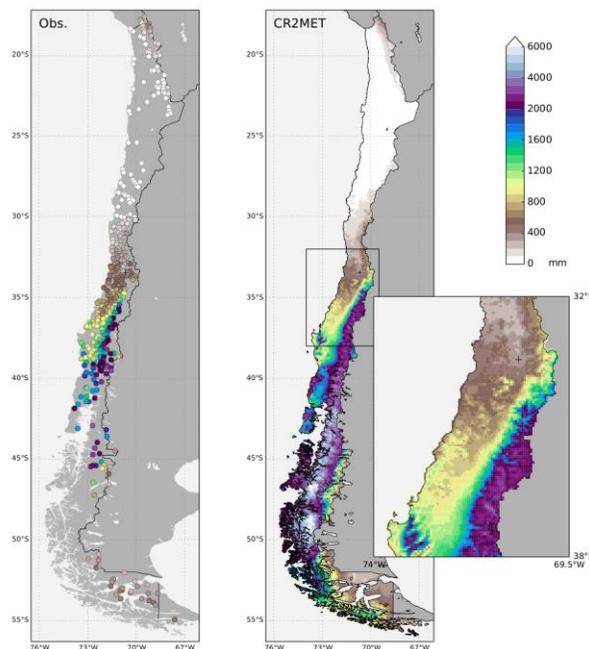


Figura 2-12 Observaciones de precipitación izquierda, producto grillado CR2met izquierda. Fuente: www.cr2.cl

En esta investigación se realizó un experimento numérico en la cuenca en estudio, los resultados reportados se exponen en la Tabla 2-2 Principales flujos hidrológicos en la cuenca de interés. Valores obtenidos entre 1/04/1985 y 31/03/2015(Vargas *et al.*, 2018).Tabla 2-2. Adicionalmente

se presenta en la ecuación 2.3 la ecuación utilizada para calcular el error de cierre o almacenamiento en la cuenca.

$$Error = \frac{100 \cdot (Pp - Q - ET)}{Pp} \quad (2.3)$$

Donde:

Pp : Precipitación media anual [mm/año]

Q : Escorrentía superficial [mm/año]

ET : Evapotranspiración [mm/año]

Tabla 2-2 Principales flujos hidrológicos en la cuenca de interés. Valores obtenidos entre 1/04/1985 y 31/03/2015 (Vargas et al., 2018).

BNA	Nombre Cuenca	Área [km ²]	Escorrentía [mm/año]	Evapotranspiración [mm/año]	Precipitación [mm/año]	Error
8351001	Rio Malleco en Collipulli	416,0	1635,3	394,6	2069,8	2%

2.3 Efecto del fuego en la hidrología

En la literatura, se han reportado varios estudios sobre la respuesta hidrológica a cambios provocados por incendios forestales (Lane et al., 2006, Emelko et al., 2010, Malvar et al., 2011, Mahat et al., 2016, Poon & Kinoshita, 2018a), los que son posibles de clasificar según su espacio temporal de análisis. Algunos estudios se enfocan en los cambios inmediatos y dramáticos en los procesos de escorrentía, como la aceleración de la erosión y sedimentación en el lecho del río (Lane et al., 2006), degradación de la calidad del agua (Emelko et al., 2010) y el aumento de los peak de flujo y rendimiento hídrico anual (Malvar et al., 2011). Por otra parte se encuentran estudios que buscan analizar los efectos a largo plazo (+ de 5 años) en la disponibilidad hídrica estacional y anual y los peak de flujo (Mahat et al., 2016).

En resoluciones temporales pequeñas, el impacto de los incendios en la hidrología de una cuenca esta escasamente comprendido y la información reportada es altamente variable. Parte del desafío es la impredecible naturaleza de los incendios forestales, esto hace imposible utilizar un diseño ideal de muestreo para investigar los cambios en la respuesta hidrológica de una cuenca.

A continuación, se exponen los principales estudios en esta área que tienen directa relación con este trabajo, en particular se seleccionaron los estudios que tienen un tiempo de análisis de más de 5 años y analizan las variables de escorrentía y evapotranspiración.

2.3.1 Cambios en la escorrentía

El año 2003 un incendio forestal destruyó la mayor parte de la vegetación (>50%) de dos cuencas ubicadas en el sector de Rocky Mountains al sur de Alberta, Canadá. En esta zona, se llevó a cabo un análisis (2005-2010) donde se reportaron las diferencias en el rendimiento del agua (mensual, estacional y anual), valores extremos (flujos altos y bajos) y flujo peak (sincronización, iniciación y recesión) entre dos cuencas quemadas y dos no quemadas.

Este estudio concluyó que, en comparación a cuencas no quemadas, las quemadas presentaron 1.2 a 2 veces (20% a 100%) más flujo anual (Figura 2-13), 1,4 a 2,2 veces (40% a 120%) peak más alto de flujo y una liberación del agua de la cuenca un 40% más rápida (Mahat et al., 2016).

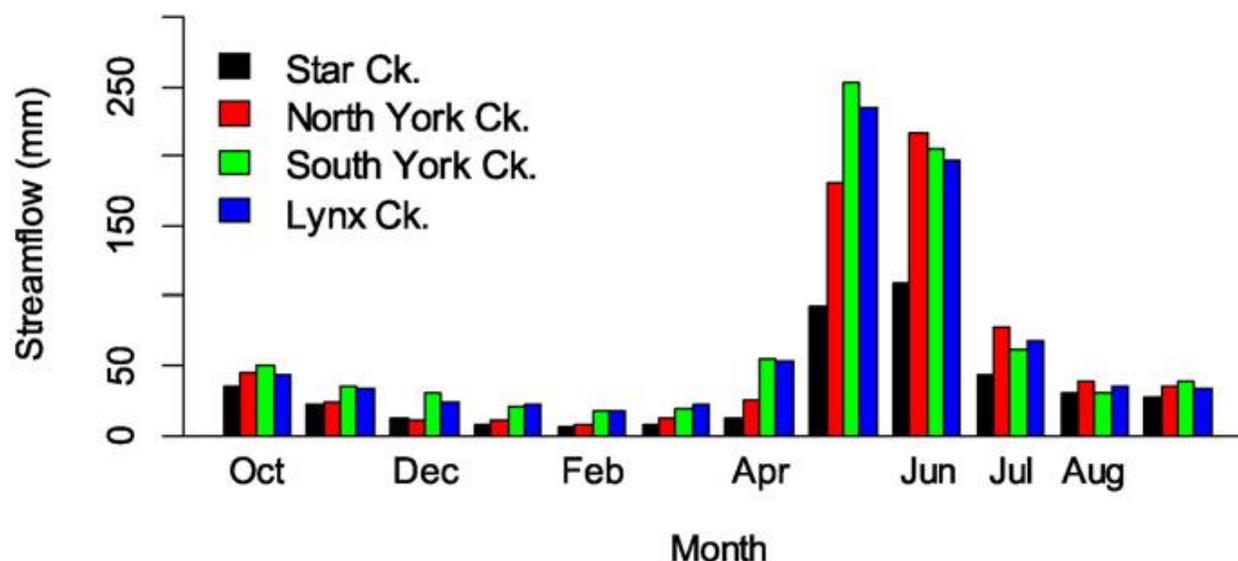


Figura 2-13 Comparación de la media de 5 años del hidrograma anual de dos cuencas no quemadas (Star Ck. Y North York Ck.) y dos quemadas (South York Ck. y Lynx Ck.) (Mahat et al., 2016).

2.3.2 Tendencia espacial y temporal de la evapotranspiración posterior a un incendio forestal.

Una variable directamente afectada por los incendios forestales es la evapotranspiración. En este contexto, la investigación busca evaluar de la variación espacial y temporal en la evapotranspiración posterior a un incendio forestal que tuvo lugar en Nuevo México, Estados Unidos el año 2011. Se utilizó un modelo de balance energético superficial simplificado (SSEBop ET), el que inicialmente se evaluó cómo representaba los procesos previo y posterior al incendio mediante la comparación con mediciones realizadas en terreno entre los años 2007 y 2014 (Figura 2-14). Esto se combinó con distintas severidades de quemado y se analizaron 16 cuencas entre los años 2001 y 2014. En promedio fue observada una disminución de 120mm de ET en las cuencas que fueron afectadas por el incendio forestal. Por otra parte zonas con alta, moderada y baja severidad presentan una disminución de ET pre-incendio en aproximadamente 103-352mm, 97-304mm y 91-268mm respectivamente (Figura 2-15) (Poon & Kinoshita, 2018).

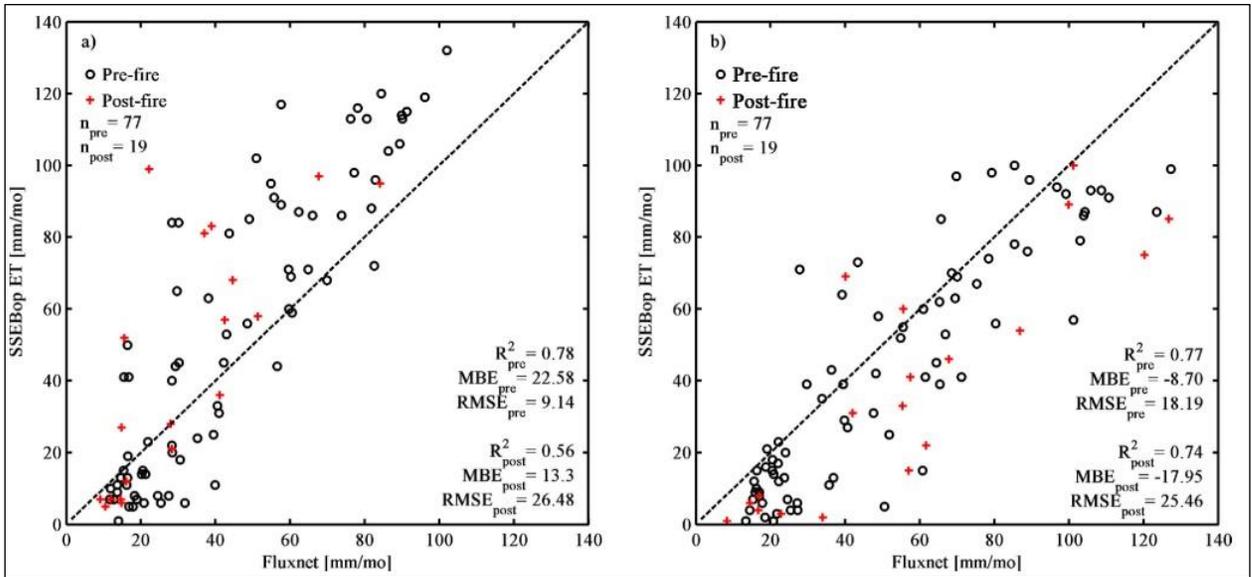


Figura 2-14 Comparación entre SSEBop ET y observaciones en terreno, para un terreno compuesto por a) conífera mixta y b) Pino (Poon & Kinoshita, 2018)

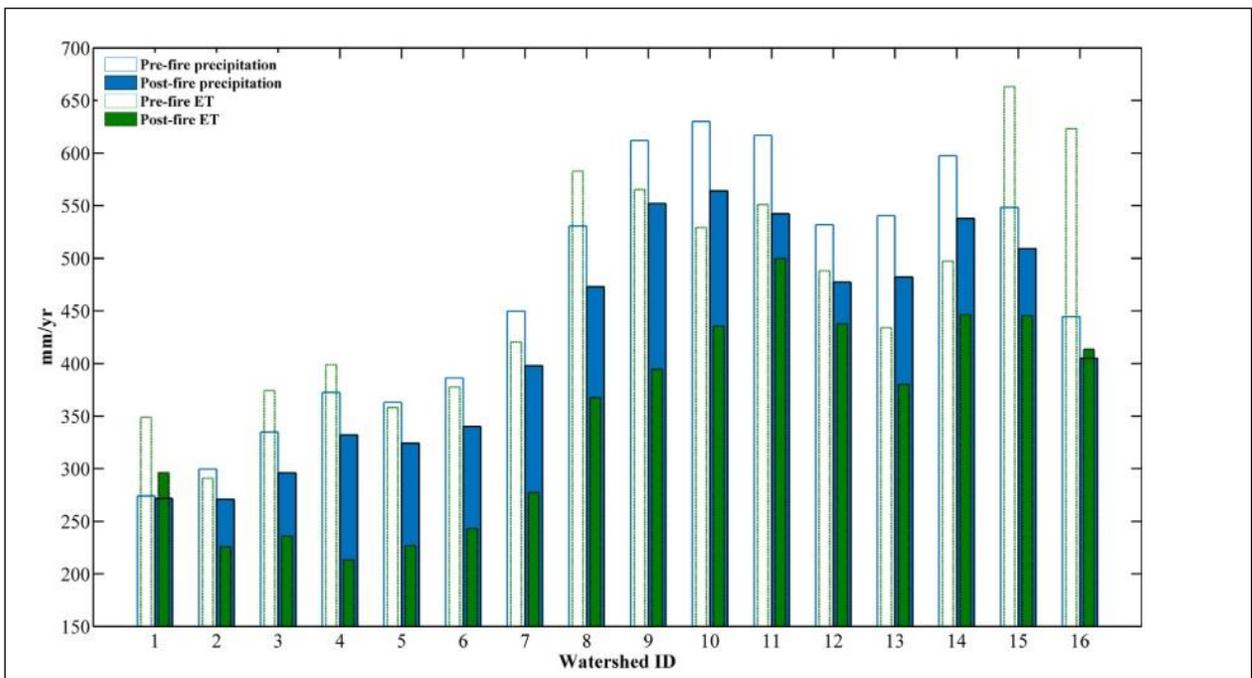


Figura 2-15 Promedio espacial de la precipitación y ET anual (mm/año) para todas las cuencas (según el ID de la cuenca) (Poon & Kinoshita, 2018)

Capítulo 3: Zona de estudio

En las fases iniciales de este proyecto se evaluó tres cuencas nacionales que fueron afectadas por incendios forestales. Estas se observan en la Tabla 3-1 con sus respectivas disponibilidades de información fluviométrica e imágenes satelitales.

Tabla 3-1 Disponibilidad de información fluviométrica y satelital para cuencas evaluadas

Cuenca	Superficie [km ²]	Año incendio forestal	Inicio mediciones fluviométricas	Imágenes satelitales disponibles (Landsat 7 o 8)
Río Liucura en Liucura	349	1970	1 de enero de 1900	No disponibles
Río Itata en Coelemu	9856	2012	1 de agosto de 1985	Disponibles
Río Malleco en Collipulli	412	2002/2015	1 de febrero de 1920	Disponibles

Finalmente, se seleccionó la cuenca del Río Malleco en Collipulli debido a la disponibilidad de información tanto fluviométrica como meteorológica entre los años 2002 al 2015, periodo que corresponde a la recuperación del bosque. Adicionalmente a que el incendio tuvo lugar de forma íntegra en las dependencias del Parque Nacional, por lo que es posible descartar el efecto antrópico en la recuperación del bosque, ya que corresponde a una zona protegida. Por otra parte, la cuenca del Río Itata fue descartada debido a su gran extensión y su alto nivel de intervención antrópica, se consideró que estas variables que podían dificultar la modelación del efecto del incendio forestal. Mientras que la cuenca del Río Liucura fue descartada debido a la inexistencia de imágenes satelitales de las misiones Landsat 7 o 8.

3.1 Descripción zona de estudio seleccionada

La hoya del río Malleco se desarrolla en el límite de la región de la Araucanía con la región del BioBío. Esta cuenca es una subcuenca de la gran cuenca del Río BioBío y se encuentra delimitada en su extremo norte con la subcuenca del Río Renaico. Mientras que su extremo sur limita con el Río Lumaco y la hoya hidrográfica del Río Cautín alto. En la sección cordillerana de esta cuenca se ubica el Parque Nacional Tolhuaca.

El régimen hidrológico de la cuenca del río BioBío es nivo-pluvial. En sus zonas altas y media el río BioBío es de régimen marcadamente nival, presentando un gran aumento caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos (DGA, 2004).

La topografía de la zona de estudio se presenta en la Figura 3-1, mientras que en la Tabla 3-2 se presentan las principales características de esta. La curva hipsométrica de la cuenca Malleco en Collipulli se muestra en la Figura 3-2.

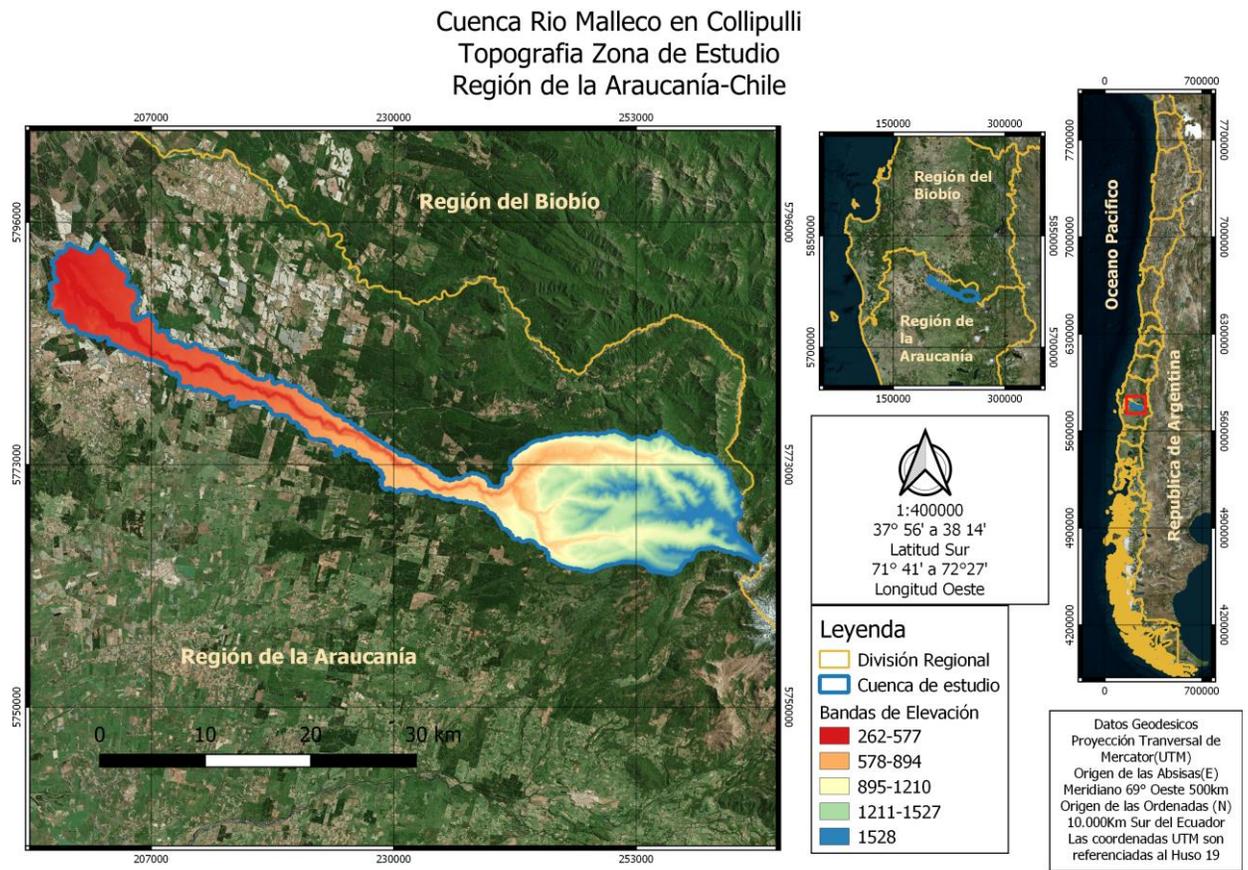


Figura 3-1 Topografía y ubicación zona de estudio

Tabla 3-2 Parámetros geomorfológicos generales de la zona de estudio

Área [km²]	412
Altura máxima [m.s.n.m.]	1832
Altura mínima [m.s.n.m.]	182
Altitud media [m.s.n.m.]	982

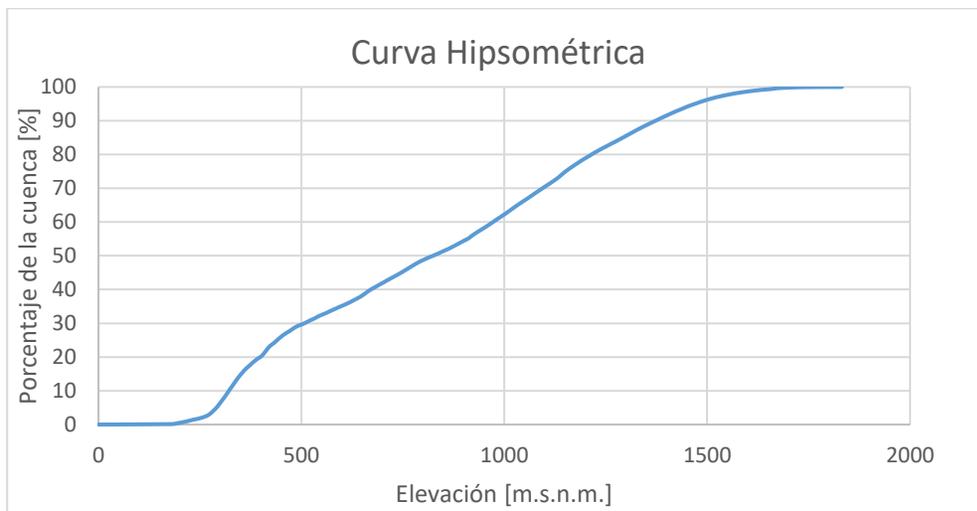


Figura 3-2 Curva hipsométrica zona de estudio

El uso de suelo en la zona de estudio se compone principalmente por bosques y praderas. Esta información se obtuvo a partir del Catastro de uso de suelo y vegetación del año 2018, disponible en la página web de Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile perteneciente al Ministerio de Bienes Nacionales. La distribución espacial de las coberturas se presenta en la Figura, y en la Tabla 3-3 se especifican las coberturas de las áreas y en la Figura 3-4 los sub-usos del bosque.

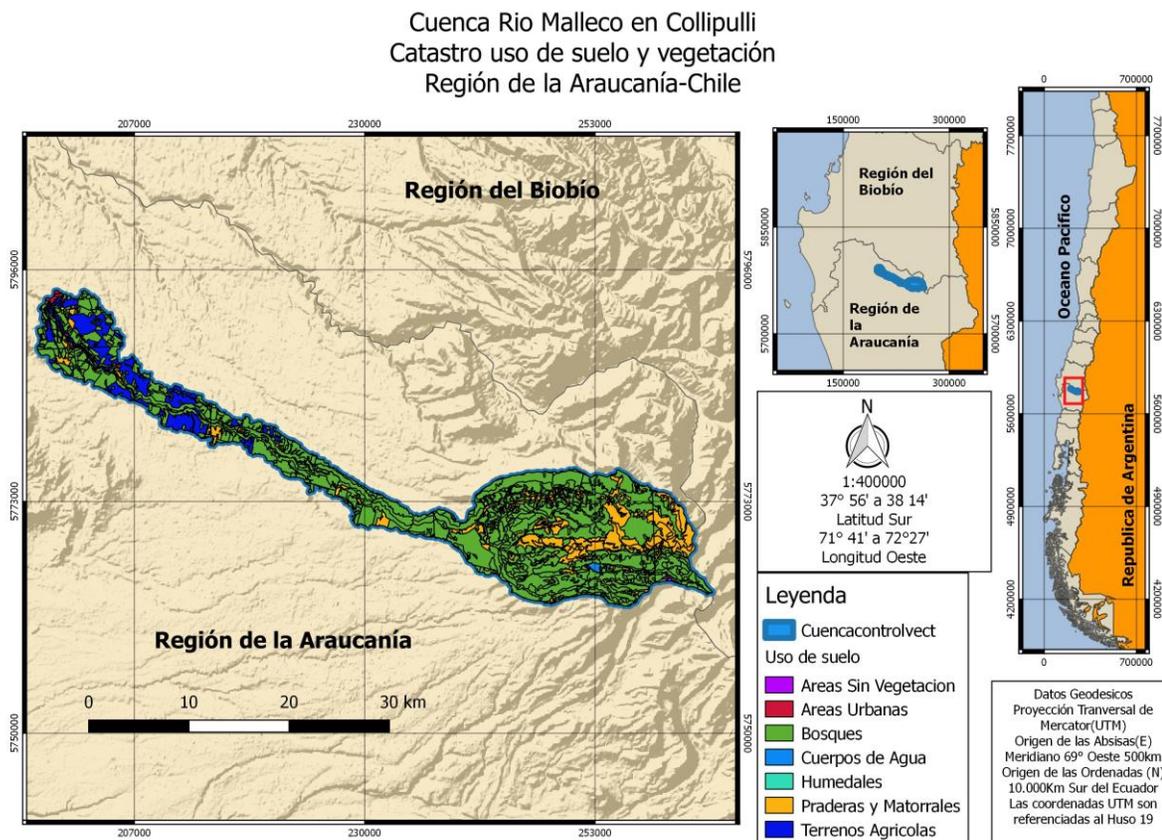


Figura 3-3 Catastro uso de suelo y vegetación, fuente: www.ide.cl

Tabla 3-3 Distribución usos de suelo en la cuenca

	Praderas y Matorrales	Bosques	Cuerpos de Agua	Áreas Sin Vegetación	Terrenos Agrícolas	Humedales	Áreas Urbanas
Área [km²]	60,63	315,11	0,89	0,43	34,61	0,21	1,23
Porcentaje de cuenca [%]	14,68	76,28	0,22	0,10	8,38	0,05	0,30

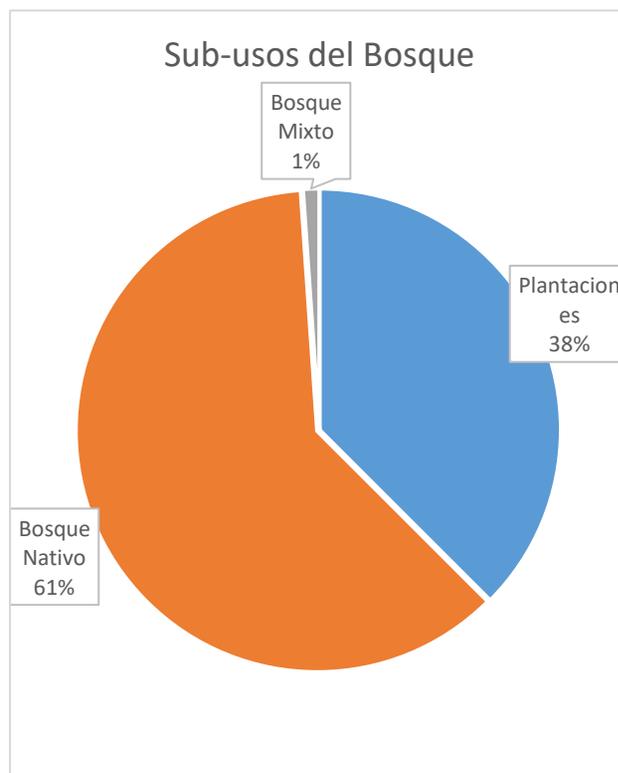


Figura 3-4 Sub-usos del bosque

La cuenca seleccionada fue afectada en dos ocasiones por incendios forestales, la primera el año 2002 y posteriormente el año 2015. Específicamente estos incendios tuvieron lugar en el Parque Nacional Tolhuaca, afectando el mismo sector de este en ambas ocasiones. En la Tabla 3-4 se exponen las áreas afectadas según su severidad para los incendios forestales presentados en la zona de estudio.

Tabla 3-4 Área afectada por los incendios del año 2002 y 2015 según sus severidades

Año Incendio	Severidad baja [km ²]	Severidad moderada-baja [km ²]	Severidad moderada-alta [km ²]	Total de área afectada [km ²]	Porcentaje del área de la cuenca afectada
2002	27	32	45	104	25 %
2015	34	24	37	95	23 %

Se puede observar que en ambos años la superficie afectada por severidad moderada-alta resulta ser mayor, destacando asimismo el año 2002.

3.2 Información hidrometeorológica disponible

Con el objetivo de exponer la disponibilidad de información en la zona de estudio, en la siguiente sección se presentan las estaciones meteorológicas y fluviométrica en la zona de estudio, con su información disponible.

3.2.1 Información fluviométrica

El punto de salida de la cuenca (Tabla 3-5) se encuentra al sur-este de la ciudad de Collipulli en la región de la Araucanía. La estación asociada es de gran importancia para este estudio debido a que posee información previa al incendio y también información relacionada a la recuperación del bosque. En la Figura 3-5 se expone la variación en el coeficiente de escorrentía obtenido con la medición de esta estación y la estación meteorológica que se ubica en el Parque Nacional (Laguna Malleco), 10 años antes del incendio del 2002 y 10 años posterior a este evento. Con el objetivo de analizar la existencia de una diferencia en el comportamiento en la generación de escorrentía que presenta la cuenca.

Tabla 3-5 Estación fluviométrica a la salida de la cuenca Río Malleco en Collipulli

Cuenca	Estación	Código BNA	Ubicación UTM 19 Sur [m]			Inicio
			Norte	Este	Altitud	
Bio-Bio	Río Malleco en Collipulli	08351001-3	5794997	725267	226	1 de febrero de 1920

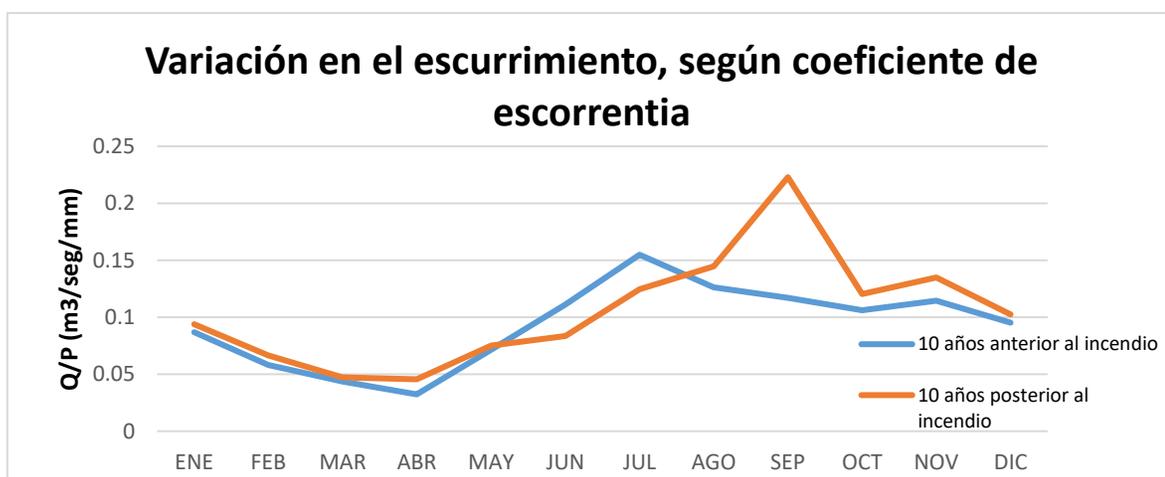


Figura 3-5 Coeficiente de escorrentía, 10 años anteriores y 10 años posteriores al incendio forestal del año 2002

3.2.2 Información Pluviométrica

Las mediciones de precipitaciones son realizadas en tres estaciones (Tabla 3-6 y Figura 3-6). Es importante mencionar que estas mediciones se utilizaron para un análisis preliminar de la zona, específicamente la estación pluviométrica de Río Malleco ubicada al interior de las dependencias del Parque Nacional (Figura 3-6). Con esta información se calculó el coeficiente de escorrentía presentado anteriormente. Como variable de entrada del modelo se utilizó el producto grillado proveniente del CR2 (Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia), los cuales son resultados de una regionalización estadística del producto de reanálisis ERA5, en conjunto con la información de las estaciones meteorológicas cercanas e información de modelos digitales de elevación (DEM).

Tabla 3-6 Estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio

Nombre	Código BNA	Ubicación UTM 19S [m]			Inicio
		Norte	Este	Altitud	
Río Malleco en Collipulli	08351001-3	5792154	197921	226	31 de diciembre de 2009
Encimar Malleco	08343002-8	5778066	226474	529	31 de julio de 1988
Laguna Malleco	08350002-6	5765998	253446	923	30 de septiembre de 1955

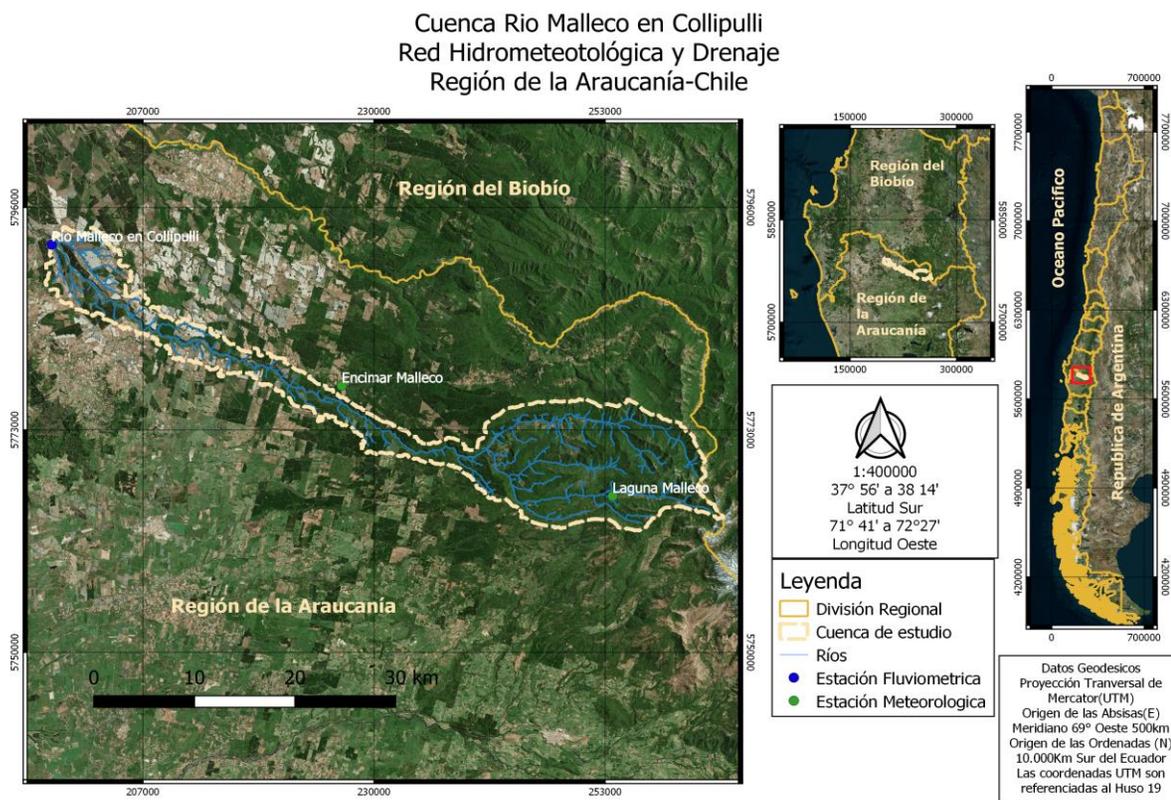


Figura 3-6 Red Hidrometeorológica y de drenaje

Capítulo 4: Metodología

Para el desarrollo de este estudio inicialmente es necesario la obtención de las variables de entradas para hacer posible el experimento numérico utilizando el modelo hidrológico VIC. Al ser un modelo grillado, es necesario representar la cuenca con una resolución espacial de 0.05° para las variables de vegetación y características hidráulicas de la matriz de suelo.

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para la obtención de los parámetros que caracterizan el efecto del incendio forestal, en particular la conductividad hidráulica saturada del suelo y la cobertura vegetal. Luego se expone la implementación del modelo y cómo se incluyeron las variables.

4.1 Obtención de las variables de entrada de cobertura vegetal

Con el objetivo de caracterizar los efectos del incendio forestal en la zona, se implementaron dos metodologías. La primera se enfoca en estimar la severidad de quemado del bosque mediante el coeficiente Normalized Burn Ratio (dNBR) y la segunda estudia el índice de área foliar (LAI) que tiene relación con la cobertura vegetal. El primero de los indicadores busca extender en la zona de estudio las mediciones de infiltración realizadas, relacionando la severidad de quemado con la infiltración medida. Mientras que el LAI se utiliza como una entrada variable en el tiempo, con una resolución temporal de tres horas.

4.1.1 Severidad de Quemado

El estudio se realizó con una resolución temporal anual desde el año 2001 al 2018. Las imágenes descargadas corresponden el mes de enero o primeros días de febrero, debido a que es el mes del año en que la planta posee mayor vigorosidad y tiene un color verde predominante. Las imágenes satelitales corresponden a productos multiespectrales provenientes de los satélites de la familia Landsat, estas se especifican en la Tabla 4-1. Mediante el algebra de banda expuesta en la sección 2.1.3 se obtuvo el valor del coeficiente dNBR que cuantifica la severidad de quemado de la zona afectada.

Tabla 4-1 Tipo de sensor y espacio temporal utilizado

Sensor	Tamaño Pixel	Periodo
LandSat 7	30 metros	2001-2013
LandSat 8	30 metros	2014-2016

4.1.2 Cobertura vegetal

Esta variable conforma una de las entradas para el cálculo de la evapotranspiración, la que se cuantifica mediante el coeficiente LAI. Este es definido como el área de hoja verde por unidad de área de suelo y se obtuvo a partir el producto satelital MODIS LAI/FPAR. Para esto se descargó una fotografía satelital mensual desde el año 2001 hasta el 2017, dando un total de 204 imágenes.

4.2 Análisis infiltración

Durante este estudio, se llevaron a cabo dos visitas al Parque Nacional Tolhuaca. La primera tuvo como objetivo hacer un reconocimiento preliminar de la zona, mientras que la segunda se enfocó en la realización de mediciones de infiltración.

El día sábado 21 de abril se realizó la primera visita. Los objetivos de esta visita fueron:

- Visitar la zona quemada del parque nacional la cual sólo había sido observada mediante imágenes satelitales.
- Dialogar con los guardaparques y administrador sobre los efectos del incendio forestal que afectó esta zona el año 2015.
- Explicarle a la comunidad del parque nacional los alcances e hipótesis de este estudio. Adicionalmente comenzar la solicitud de permisos para la realización de pruebas de infiltración.

Las principales impresiones del personal del parque nacional fueron:

- Zona quemada corresponde al sector del río Pichimalleco y la causa se atribuye a una fogata mal apagada.
- Flora quemada corresponde principalmente a Araucarias, Ñirre, Lengua y Rauli.
- Topografía plana del sector quemado produjo un bajo nivel de sedimentos en el río posterior al incendio forestal.
- Posterior al incendio forestal, se ha observado un bajo nivel del flujo base del río Malleco.
- En el sector del incendio forestal se identificó un bajo nivel de infiltración (8-10cm).
- El estado actual de la zona quemada se ve compuesta principalmente por Quila, Ñirre y vástagos de Araucarias.

La segunda visita se realizó el lunes 21 de mayo permaneciendo en el lugar por 4 días y tenía por objetivo caracterizar la infiltración del suelo en el sector del incendio forestal. Para esto se utilizó un permeámetro de Guelph (ver Anexo A).

4.3 Implementación del modelo hidrológico VIC

En este estudio se realizaron 6 experimentos numéricos. Sus diferencias en las variables de entradas son resumidas en el diagrama (Figura 4-1). Las modelaciones son identificadas por su nombre característico que se presenta en color naranja en este mismo diagrama. De esta forma, se pretende identificar en la sección de resultados que metodología resulta más efectiva para representar de la situación post incendio forestal.

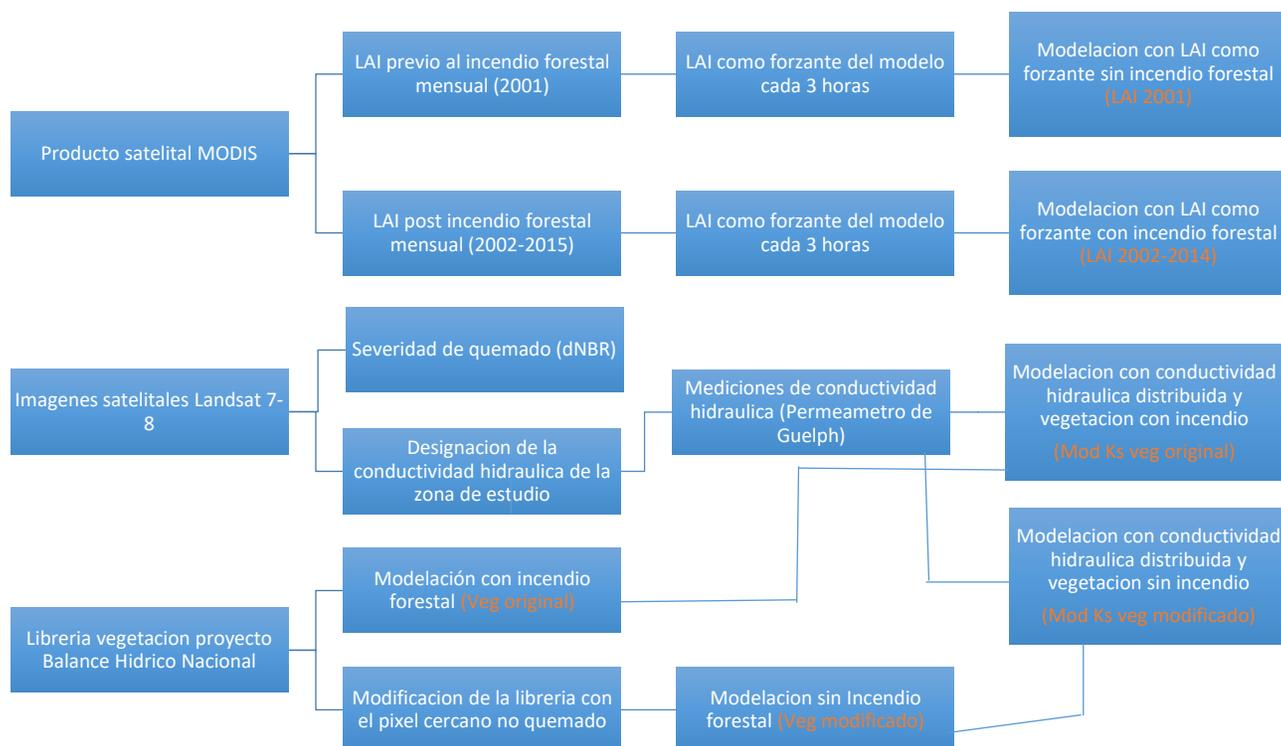


Figura 4-1 Metodología de las modelaciones a realizar

4.3.1 Parámetros generales VIC

El modelo VIC caracteriza la cuenca de estudio mediante una serie de archivos, estos tienen relación con el suelo, la vegetación y un archivo global que relaciona a los anteriores.

En particular en este estudio se trabaja con una celda de 5 kilómetros de extensión en sus lados y el modelo es corrido con un paso temporal de 3 horas y los resultados se exportan a nivel diario.

Al finalizar el algoritmo de optimización, son exportadas las 10 mejores modelaciones con respecto al indicador KGE, con una resolución diaria. Los flujos que son exportados se exponen en la Tabla 4-2 junto a la nomenclatura utilizada por el modelo para identificarlos.

Tabla 4-2 Flujos de salida del modelo

Flujos	Nomenclatura modelo
Escorrentía	Out_Runoff
Flujo Base	Out_Baseflow
SWE	Out_SWE
Cobertura nival	Out_Snow_Cover
Humedad de suelo	Out_Soil_Moist
Evaporación Total	Out_Evap

Las fechas de calibración y validación se presentan en la Tabla 4-3 a continuación.

Tabla 4-3 Tramos temporales de validación y calibración

Proceso de Modelación	Fecha de Inicio	Fecha de Término
Calibración	1/04/2002	31/03/2012
Validación	1/04/2012	31/03/2014

4.3.2 Archivos de vegetación

La vegetación es caracterizada mediante dos archivos, la librería de vegetación y los parámetros de vegetación. Ambos archivos son cortesía del proyecto “Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la macrozona sur y parte norte de la macrozona austral” (Vargas et al., 2018). A continuación, se presentan los parámetros que componen estos archivos y como se obtuvieron.

Inicialmente se definieron 11 clases de cobertura de suelo posible (Tabla 4-4). Estas clases fueron designadas anteriormente por un mapa de coberturas de suelo realizado por la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile. En este documento se describe un producto cartográfico de cobertura de suelo de Chile continental para el año 2014 que fue obtenido a través de un proyecto de colaboración internacional que incorporó a investigadores de China, Estados Unidos y Chile (P, Galleguillos, & Estados, 2016). El trabajo científico con todos los detalles metodológicos está disponible en la publicación de Zhao et al.(2016). La resolución de este producto corresponde a 30m. Debido a que esta clasificación se llevó a cabo el año 2014, considera que la zona de estudio es una zona quemada y en consecuencia existen gran cantidad de matorrales, como se observa en la Figura 4-2. Adicionalmente se utilizó el producto de MODIS que caracteriza el LAI de la zona con una resolución de 1km. Con estos dos productos satelitales se clasificó la vegetación en cada pixel y se le designó una variación mensual promedio de LAI a cada clase de vegetación. Es importante aclarar que esta información sólo se utiliza en las modelaciones que no requieren de esta variable cambiante en el tiempo, LAI(t) (Mod Ks veg

original, Mod Ks veg modificado, Veg Original y Veg modificado), debido a que posee las medias mensuales y no la variación interanual registrada en la sección 4.2.

Tabla 4-4 Tipos de vegetación disponibles en la librería vegetación VIC

Clase	Tipo de vegetación
1	Anuales
2	Hortalizas
3	Frutales
4	Viñas y Parronales
5	Bosque
6	Pastizales
7	Matorrales
8	Humedales
9	Cuerpos de Agua
10	Superficies Impermeable
11	Hielos y Nieves

Cuenca Rio Malleco en Collipulli
 Cobertura de suelo segun Zhao et al. 2016
 Región de la Araucanía-Chile

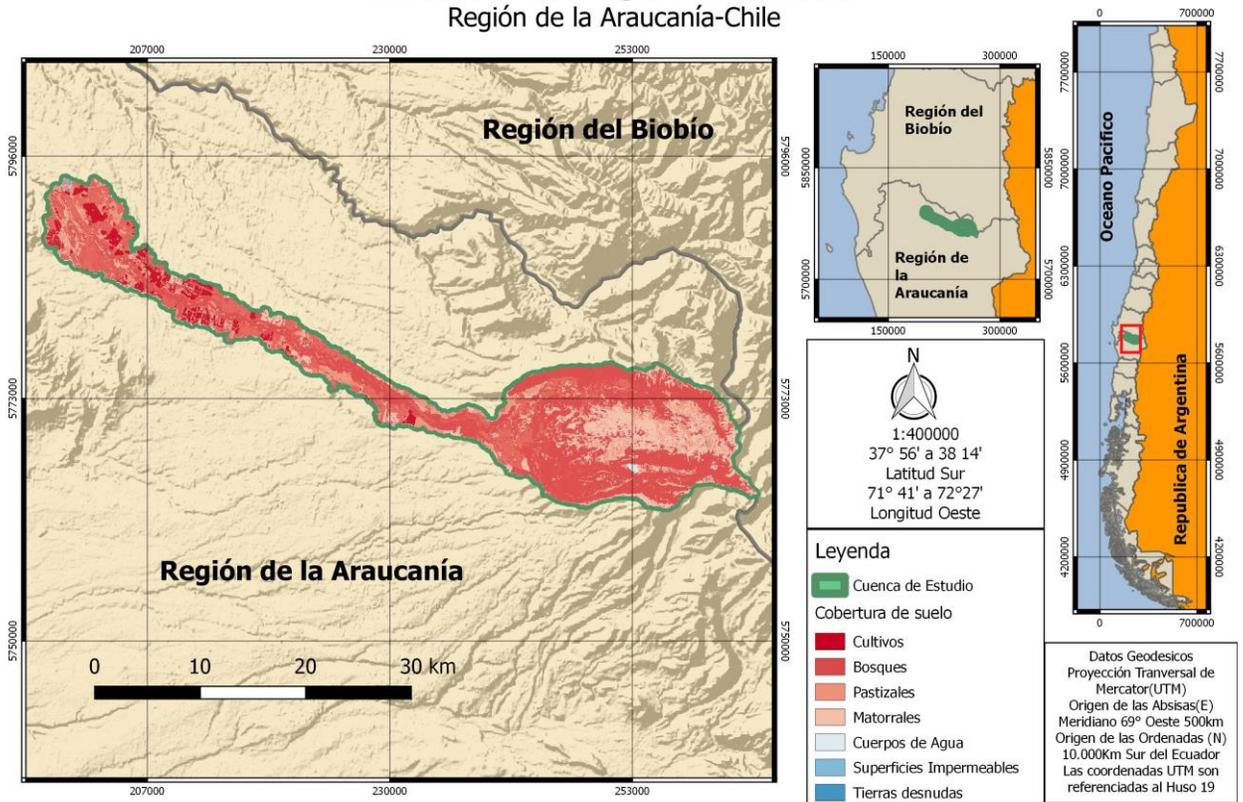


Figura 4-2 Cobertura de suelo zona de estudio

Por otra parte, el archivo de parámetros de vegetación describe la composición de cada celda y usa la misma grilla existente para la separación geográfica, este archivo une las características de cada cobertura con una librería de vegetación.¹

Los parámetros de vegetación requeridos y la librería de vegetación se exponen en la Tabla 4-5 y Tabla 4-6 respectivamente.

Tabla 4-5 Variables del archivo parámetros de vegetación

Nombre variable	Unidad	Rango	Descripción
vegtat_ty pe_num	N/A	[1,11]	Número de tipos de vegetación en una celda de la cuadrícula
veg_class	N/A	[1,11]	Número de identificación de la clase de vegetación (índice de referencia a la biblioteca de vegetación)
Cv	Fracción	[0,1]	Fracción de la celda de la cuadrícula cubierta por el tipo de vegetación
root_dept h	m	[0, profundidad estrato]	Raíz de espesor de la zona (suma de las profundidades es la profundidad total de penetración de las raíces)
root_fract	Fracción	[0,1]	Fracción de la raíz en la zona de la raíz actual
LAI	Fracción	[0,1]	Índice del área de follaje en tipo de vegetación

Fuente: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/VegParam.shtml>

Tabla 4-6 Variables del archivo librería de vegetación

Nombre variable	Unidad	Rango o valor	Descripción
Veg_class	N/A	[1,11]	Número de tipos de vegetación en una celda de la cuadrícula
overstory	N/A	0 ó 1	Bandera para indicar si el tipo de vegetación actual tiene un dosel (True para la masa arbórea presente [por ejemplo, los árboles], no para FALSE dosel presente [por ejemplo: pasto])
rarc	s/m	2	Resistencia a la arquitectura del tipo de vegetación (~2s/m)
rmin	s/m	100	La resistencia mínima de estoma del tipo vegetación (~ 100 s/m)
Albedo	Fracción	[0,1]	Albedo de onda corta para el tipo de vegetación
Rough	m	[0,∞]	Longitud de rugosidad en vegetación

¹www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/

displacement	m	[0,∞]	Altura de desplazamiento en vegetación
wind_h	m	[0,∞]	Altura a ala que se mide la velocidad del viento
RGL	W/m2	30-100	La radiación entrante de onda corta mínima a la que habrá transpiración. Para los árboles se trata de 30 W/m2, para los cultivos de alrededor de 100 W/m2
rad_atten	fracción	[0,1]	Factor de atenuación de la radiación. Normalmente en 0,5 aunque puede ser necesario ajustar para altas latitudes.
wind_atten	fracción	[0,1]	Atenuación de la velocidad a través del arbusto. El valor por defecto ha sido 0,5
trunk_ratio	fracción	[0,1]	Relación entre la altura total del árbol que es el tronco (no sucursales). El valor por defecto ha sido 0,2

Fuente: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/VegLib.shtml>

4.3.3 Parámetros de suelo

Corresponde al archivo que caracteriza el suelo que requiere el modelo VIC describe las propiedades para cada celda que compone la cuadrícula en el dominio del modelo. Adicionalmente tiene información que celdas van a ser simuladas, y su latitud y longitud

Es importante mencionar que muchos de estos parámetros son calibrados, según se especifica en la sección 4.3.7 Los otros parámetros son extraídos del manual del modelo VIC, el cual entrega valores estándar para los parámetros. En la Tabla 4-7 se presentan la totalidad de las variables considerados para caracterizar el suelo.

Tabla 4-7 Parámetros de suelo

Nombre variable	Unidad	Rango o valor	Descripción
Binfilt	N/A	[0,1]	Parámetro que define la forma de la curva de infiltración
Ds	Fracción	[0,1]	Fracción de Ds max donde el flujo base comienza a ser no lineal (Ds)
Ds max	mm/día	[0,∞]	Velocidad máxima del flujo base
Ws	fracción	[0,1]	Fracción de la máxima humedad del suelo donde se presenta un flujo base no lineal
c	N/A	2	Exponente del flujo base utilizado en la curva
expt	N/A	[0,∞]	Parámetro que describe la variación de Ksat con la humedad del suelo
K sat	mm/día	[0,∞]	Conductividad hidráulica saturada
phi_s	mm/mm	[0,∞]	Humedad del suelo parámetro de difusión
init_moist	mm	[0,∞]	Contenido de humedad inicial de la capa
elev	m	[0,∞]	Elevación media de la celda de la cuadrícula
depth	m	[0,∞]	el espesor de cada capa de la humedad del suelo
avg_T	°C	[-∞,∞+]	Temperatura del suelo medio
dp	m	[0,∞]	Profundidad del suelo de amortiguación térmica
bubble	cm	[0,∞]	Presión de burbujeo del suelo
quartz	Fracción	[0,1]	Contenido de cuarzo del suelo

bulk_densit y	kg/m ³	[0,∞]	Densidad aparente de la capa de suelo
soil_density	kg/m ³	[0,∞]	Densidad de las partículas del suelo
off_gmt	horas	[-12,12]	La zona horaria de gmt
Wrc_fract	Fracción	[0,1]	Fraccional del suelo contenido de humedad en el punto critico
Wpwp_fract	Fracción	[0,1]	Fraccional del suelo contenido de humedad en el punto de marchitez permanente
rough	m	[0,1]	Rugosidad de la superficie del suelo desnudo
snow_rough	m	[0,1]	Rugosidad de la superficie de la capa de nieve
annual_prec	mm	[0,∞]	Precipitación media anual
resid_moist	Fracción	[0,1]	Humedad del suelo capa residual de humedad
fs_active	N/A	1 o 0	Si es 1 implica que suelo congelados si se calculan y 0 que no

Fuente: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Documentation/SoilParam.shtml>

4.3.4 Variables forzantes

Las forzantes meteorológicas utilizadas por el modelo son:

1. Precipitación
2. Velocidad del viento
3. Humedad relativa
4. Temperatura de aire

Estos variables tienen una resolución temporal de 3 horas y se obtienen de una grilla rectangular de 0,05° latitud-longitud para el territorio de Chile continental para un periodo entre los años 1979-2016. Este producto fue desarrollado² en el marco del proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional (Vargas et al., 2017) y actualizado en proyectos posteriores (Vargas et al., 2018) y responde a la necesidad de contar con datos distribuidos espacialmente coherentes con la información observada disponible.

4.3.5 Función objetivo utilizada: Kling-Gupta Efficiency(KGE)

Los indicadores comúnmente utilizados para la evaluación de los modelos hidrológicos son el error medio cuadrático medio (MSE) y su símil normalizado el Nash-Sutcliffe(NSE). Estos indicadores

²www.cr2.cl/datos-productos-grillados/

pueden generar problemas durante la calibración, debido a la interacción entre los componentes que integran estos coeficientes y errores en la evaluación con datos observados (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009). En general últimos estudios llaman a evitar utilizar el coeficiente NSE para la evaluación del rendimiento de caudales simulados, debido a que la descomposición teórica ha demostrado que el balance hídrico modelado puede ser incorrecto y la variabilidad del flujo severamente subestimado a pesar que el coeficiente NSE presenta un valor alto (Gupta et al., 2009). Esto se explica ya que la destreza que tiene el modelo es comparada con el valor medio de las observaciones.

Es por ello que la función objetivo utilizada en la calibración corresponde al coeficiente de eficiencia Kling-Gupta (KGE). Este indicador multi-criterio consiste en el cálculo de la distancia euclidiana del óptimo con respecto de 3 criterios, que cuantifican la variabilidad del flujo o desviación estándar (α), volúmenes totales o valor medio (β) y buen ajuste en el tiempo (r) (Figura 2-15). Las fórmulas 4.1-4.4 para el cálculo de este indicador se presenta a continuación:

$$KGE = 1 - ED \quad (4.1)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (4.3)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (4.4)$$

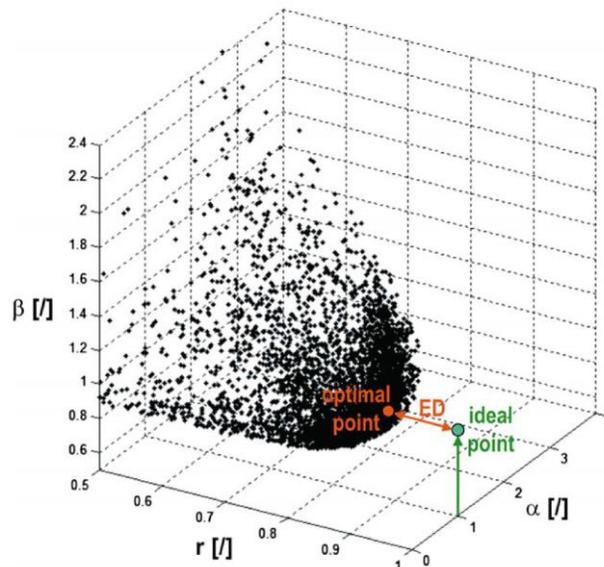


Figura 4-3 Frente de Pareto tridimensional de r α y β . ED es la distancia Euclidiana entre el punto óptimo y el punto ideal (Gupta et al., 2009)

4.3.6 Criterio de calibración utilizado: Shuffled Complex Evolution (SCE)

Este algoritmo combina el método Simplex, búsqueda aleatoria y evolución competitiva (Duan et al, 1992). Los pasos por seguir por este mecanismo de calibración se exponen a continuación

1. “Generar población inicial en el espacio de parámetros y calcular el valor objetivo de la función en cada punto.
2. Ordenar los **s** puntos por orden de aumento del valor de la función objetivo (suponiendo que el objetivo es minimizar el valor criterio).
3. Dividir los **s** puntos en **p** complejos, cada uno con **m** puntos
4. Evolucionar cada complejo de acuerdo con el algoritmo de evolución compleja competitiva, basado en el esquema de búsqueda de descensos Simplex. El procedimiento de evolución genera nuevos puntos llamados “descendientes” que, en promedio, se encuentran dentro de la región de mejoramiento.
5. Combinar los puntos en los complejos evolucionados en una población de muestra única; clasificar la población de muestra en orden creciente de valor de criterio y repetir paso (3).
6. Comprobar criterio de convergencia.”(Mendoza, 2019)

Esto se ejemplifica en la

Figura 4-4 a continuación.

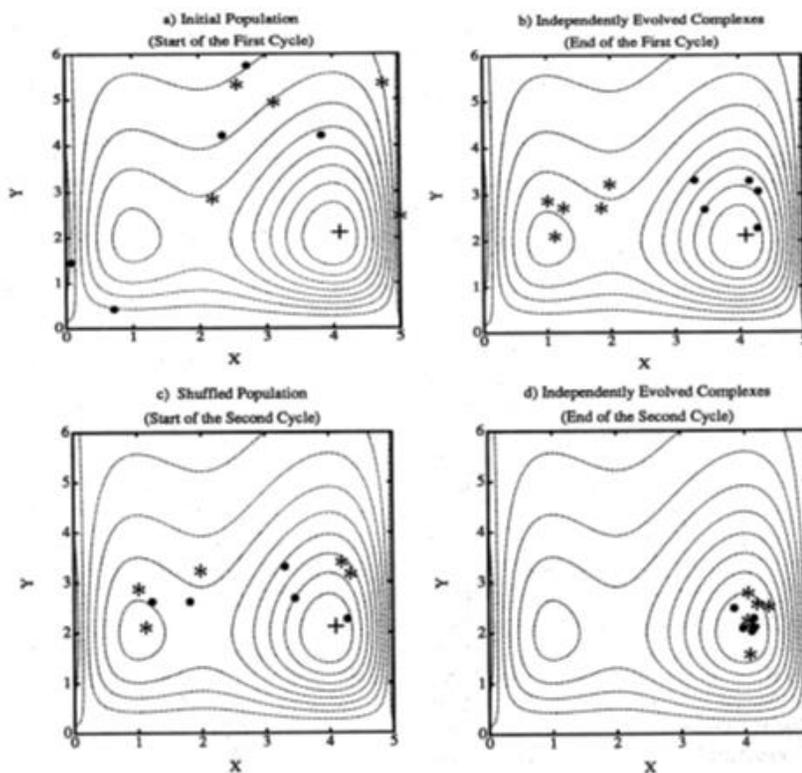


Figura 4-4 Esquema de funcionamiento SCE (Duan, Soroosh, & Gupta, 1992)

4.3.7 Parámetros a calibrar

El algoritmo utilizado para la calibración corresponde al Shufflex Complex Evolution (Duan et al. 1992). Los parámetros incluidos en el proceso de calibración se presentan en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8 Parámetros a calibrar con SCE

Variable	Unidades	Rango	Descripción
Binfilt	N/A	[0,1]	Parámetro que define la forma de la curva de infiltración
Ds	fracción	[0,1]	Fracción de D _{smax} donde el flujo base comienza a ser no lineal (D _s)
D _{smax}	mm/día	[0,∞]	Velocidad máxima del flujo base
W _s	fracción	[0,1]	Fracción de la máxima humedad del suelo donde se presenta un flujo base no lineal
C _{expt}	N/A	[3,∞]	Exponente de la ecuación de Campbell para la conductividad hidráulica

h1	m]0,01,h2]	Profundidad del estrato 1
h2	m]h1, ∞]	Profundidad del estrato 2
h3	m]h1,∞]	Profundidad del estrato 3
Tmin	°C	[-∞,1]	Temperatura mínima donde se presenta precipitación en estado líquido
Rsnow	m	[0,1]	Rugosidad de la nieve
Ksat	mm/dia	[0,∞]	Conductividad hidráulica saturada

El parámetro de conductividad hidráulica saturada (Ksat) se calibro en cuatro de los experimentos numéricos, en los dos restantes se utilizó la información de las mediciones realizadas con el permeámetro de Guelph.

4.4 Metodologías de análisis de resultados

Con el objetivo de cuantificar el rendimiento de los experimentos con un enfoque multicriterio, en la siguiente sección se exponen un conjunto de metodologías de análisis de resultados.

4.4.1 Indicadores hidrológicos

Se contempla la utilización de 5 indicadores (Tabla 4-9) con la finalidad de analizar los resultados de distintas perspectivas.

Tabla 4-9 Indicadores Hidrológicos

Indicador	Descripción	Unidades
Pendiente	Pendiente de la curva de duración entre el 20% y 70%	[-]
Caudal medio	Caudal medio diario	[m ³ /seg]
Q 5%	Caudales bajo el 5% de probabilidad de excedencia (flujos altos)	[m ³ /seg]
Q 95%	Caudales sobre el 95% de probabilidad de excedencia (flujos bajos)	[m ³ /seg]

Coefficiente de escorrentía	Cociente entre el caudal medio y la precipitación media	[m ³ /seg/mm]
-----------------------------	---	--------------------------

Luego se procedió a calcular % bias (Formula 4.5).

$$\%bias = \frac{observación-modelación}{observación} \cdot 100 \quad (4.5)$$

4.4.2 Curva de duración

Para la realización de esta curva se utilizó una distribución de probabilidad de Weibull (Fennessey, Vogel, & Members, 1990), la formula se expone a continuación.

$$p_i = \frac{i}{n+1} \quad (4.6)$$

Donde:

i: Posición de los caudales ordenados de mayor a menor

n: Número total de días con datos

Esta metodología consiste en ordenar los caudales de espacio temporal de interés de mayor a menor y posteriormente designarles una probabilidad según la formula enunciada anteriormente.

Capítulo 5: Resultados

En la siguiente sección se presentarán los resultados de este estudio. Inicialmente se expondrán los resultados del análisis de percepción remota realizado para caracterizar la cobertura vegetal, posteriormente se presentarán los resultados de las mediciones de infiltración realizadas en terreno. Para finalizar con los resultados de los experimentos numéricos de las distintas configuraciones desarrolladas.

5.1 Variación espacial y temporal de la cobertura vegetal

Utilizando imágenes satelitales y la metodología expuesta en las sub-secciones 4.1.1 y 4.1.2 se cuantifico la variación temporal y espacial de la cobertura vegetal. En las siguientes sub-secciones se presentan los resultados obtenidos de la severidad de quemado y de cobertura vegetal según el indicador LAI.

5.1.1 Severidad de quemado

En la Figura 5-1 se muestra un mapa del indicador dNBR para el año 2003. Esta imagen corresponde a la primera post-incendio.

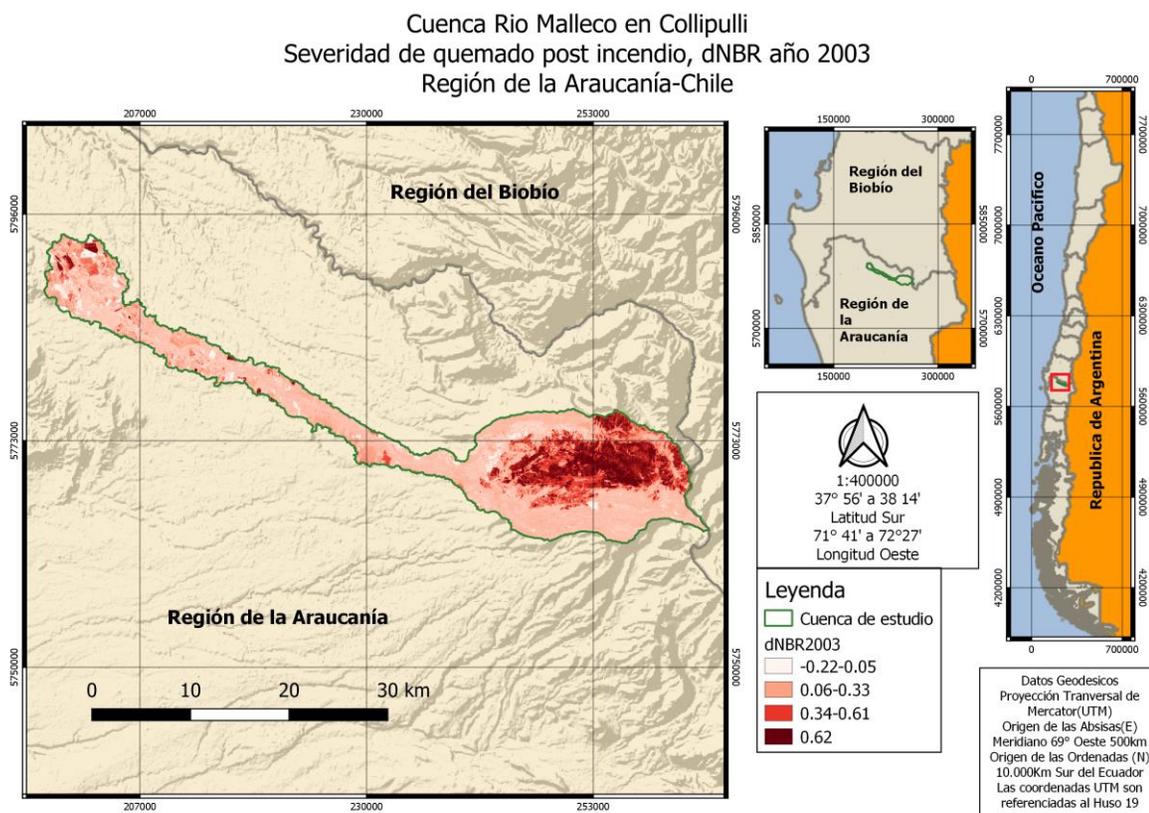


Figura 5-1 Mapa de severidad de quemado post incendio forestal, año 2003

La Figura 5-1 presenta la zona quemada posterior al incendio forestal del año 2002 con las diversas severidades de quemado que conllevó. Queda en evidencia que el incendio forestal se encuentra completamente contenido en las dependencias del Parque Nacional Tolhuaca y que el incendio produjo altas severidades en la zona central de éste, específicamente en torno a la zona del Río Pichimalleco, registrando valores de severidad sobre 0.62.

La variación anual de las severidades se presenta en la Figura 5-2, donde se observa que las severidades alta y alta-moderada presenta un claro peak los años posterior al incendio (2003 y 2016), para después decaer rápidamente los primeros 4 años y luego estabilizarse decayendo de forma más gradual hasta el nuevo peak el año 2015. Por otra parte, la severidad baja-moderada tiene un comportamiento más errático donde se observan otros máximos no atribuibles al incendio forestal, como por ejemplo el peak del año 2010.

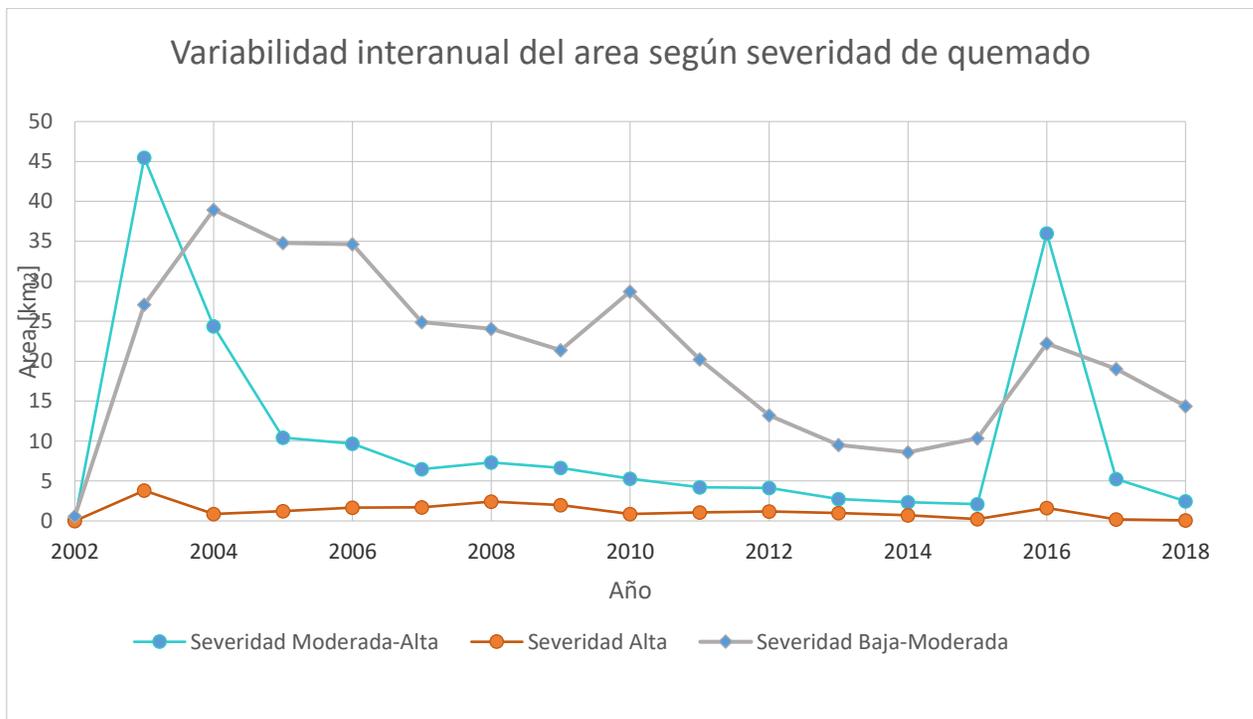


Figura 5-2 Variabilidad interanual de severidad de quemado

Esta información se utilizó para caracterizar la infiltración del terreno dentro del Parque Nacional Tolhuaca, combinando el valor de conductividad hidráulica obtenido en las mediciones en terreno y la severidad de quemado donde se llevó a cabo la prueba.

5.1.2 Cobertura Vegetal

En la Figura 5-3 se expone un mapa del LAI captado por el producto LAI/FPAR del satélite Modis del año 2003, para la situación post incendio forestal.

Cuenca Rio Malleco en Collipulli
 Cobertura Vegetal post incendio, LAI año 2003
 Región de la Araucanía-Chile

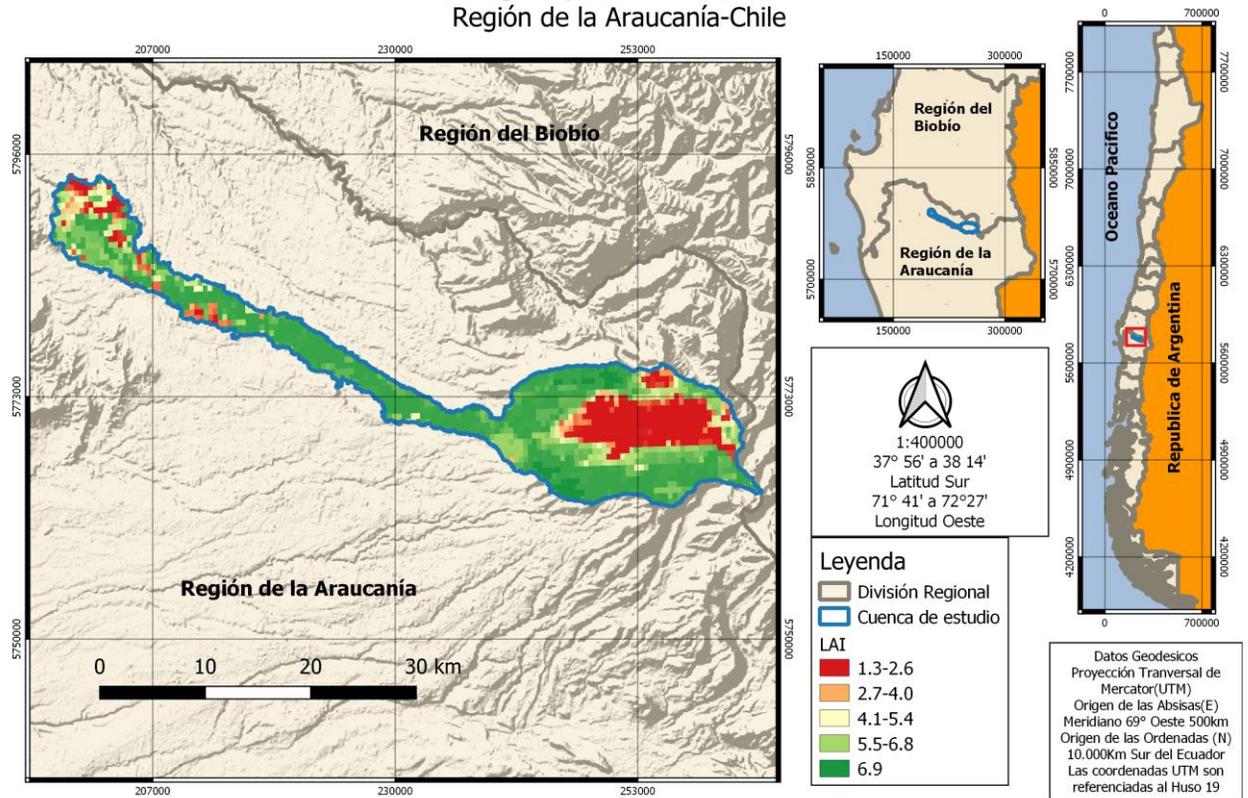


Figura 5-3 Cobertura vegetal post incendio, LAI 2003

La Figura 5-3 expone la detección mediante el producto Modis posterior al incendio forestal. Los valores de índice de área foliaren la zona quemada alcanzan valores mínimos de 1,3, mientras que en las zonas colindantes al incendio los valores son del orden de 5,5 a 6,9. En esta figura se aprecia que mediante el producto satelital MODIS es posible caracterizar la zona quemada y concluir que el sector quemado se encuentra en el Parque Nacional Tolhuaca. Al igual que el análisis realizado anteriormente en la sección 5.1.1.

El máximo estado de recuperación de la cobertura vegetal se alcanza en enero del 2015(Figura 5-4). Mientras que la primera imagen post incendio de este mismo año pero del mes de marzo se presenta en la Figura 5-5.

En la Figura 5-4 se observa el máximo estado de recuperación previo al incendio forestal. Se aprecia que existe una alta recuperación de la cobertura vegetal pero que ésta no es completa, quedando zonas con un bajo nivel de cobertura, aún después de 12 años de recuperación. El incendio del año 2015 generó una zona quemada similar a la del año 2003 (Figura 5-5). Adicionalmente, se refleja en la Figura 5-5 el efecto de la variación mensual de la vegetación, considerando que la imagen corresponde al mes de marzo y que, por lo tanto, presenta menores valores de cobertura que las Figuras de los meses de enero (Figura 5-3 y Figura 5-4).

Al comparar la Figura 5-3 con las Figura 5-4 y Figura 5-5 se observa el bajo nivel de cobertura en la salida de la cuenca y que es incremental en el tiempo, lo que se puede deber al efecto de deforestación propio del desarrollo de la ciudad de Collipulli o posibles sequías prologadas en las zonas rurales.

La variación de los promedios anuales de LAI y la variación mensual previa al incendio y post incendio se exponen en la Figura 5-6 y la Figura 5-7 respectivamente.

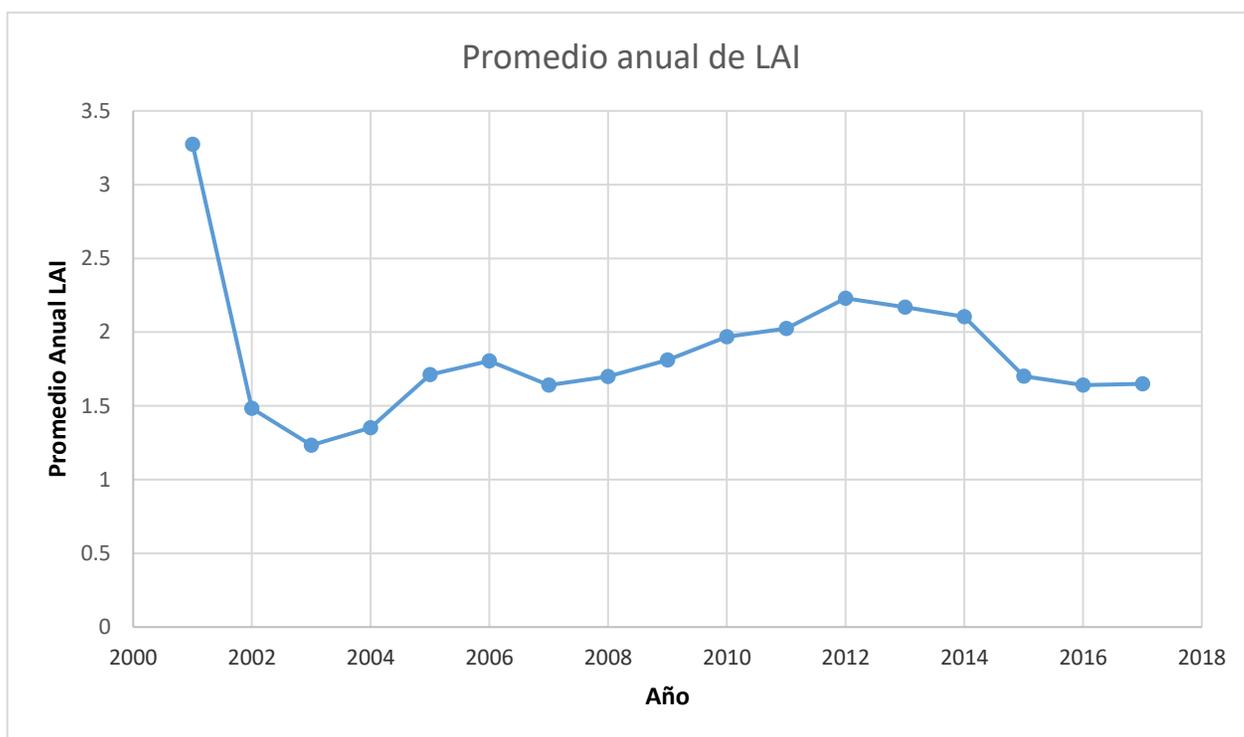


Figura 5-6 Promedio anual del indicador LAI, 2001-2017

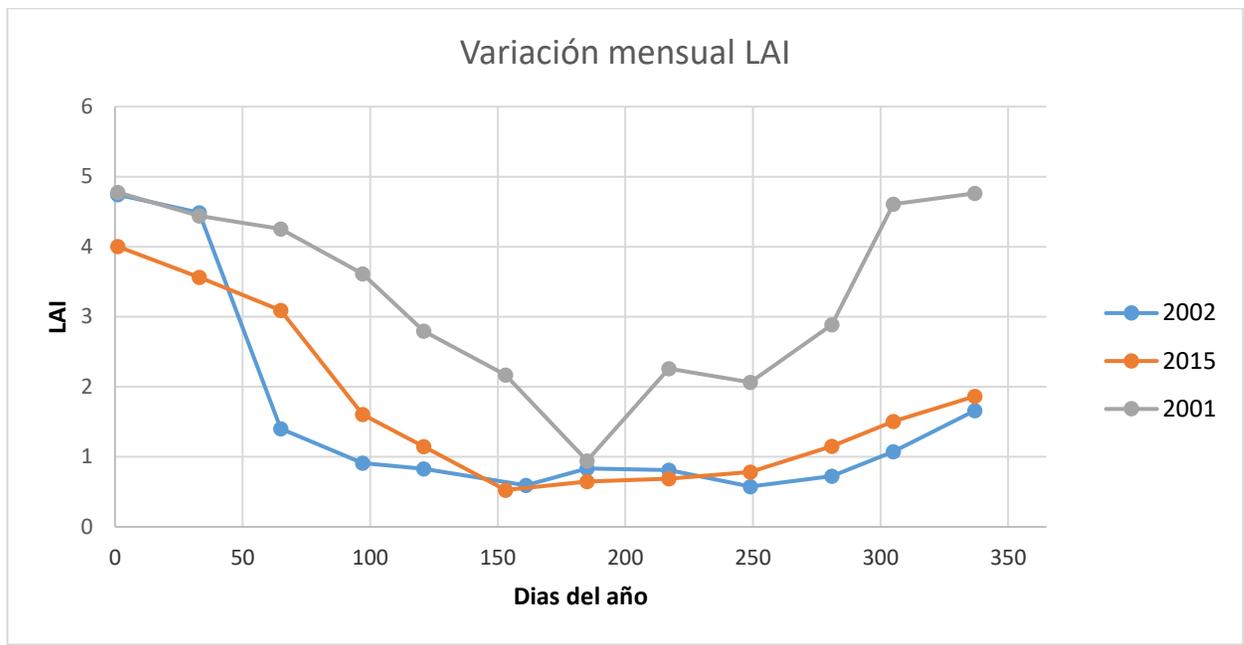


Figura 5-7 Variación mensual indicador LAI, caso previo incendio (2001) y caso posterior incendio (2002 y 2015)

Al analizar numéricamente el efecto del incendio forestal en el LAI, se observa una disminución del 55% generada por el evento del año 2002 (Figura 5-6) mientras que el descenso generado por el evento del año 2015 corresponde a una disminución de 19%. Al analizar la variación mensual que presenta el índice foliar en un año sin el efecto del incendio forestal versus un año posterior a un incendio (Figura 5-7), se percibe una fuerte disminución del LAI producto de los incendios en los años 2015 y 2002. Posteriormente, se evidencia la falta de restauración de la cobertura posterior al invierno significando una diferencia de hasta un 65% de cobertura vegetal con respecto a la situación previa a este evento (2001).

5.2 Mediciones de Infiltración

Se llevaron a cabo 10 mediciones de infiltración utilizando el Permeámetro de Guelph. La ubicación de los puntos se realizó con el objetivo de caracterizar la infiltración de las distintas severidades de quemado presentes en la zona de estudio (Figura 5-8).

Cuenca Rio Malleco en Collipulli
 Toma de muestras de infiltración, Parque Nacional Tolhuaca
 Región de la Araucanía-Chile

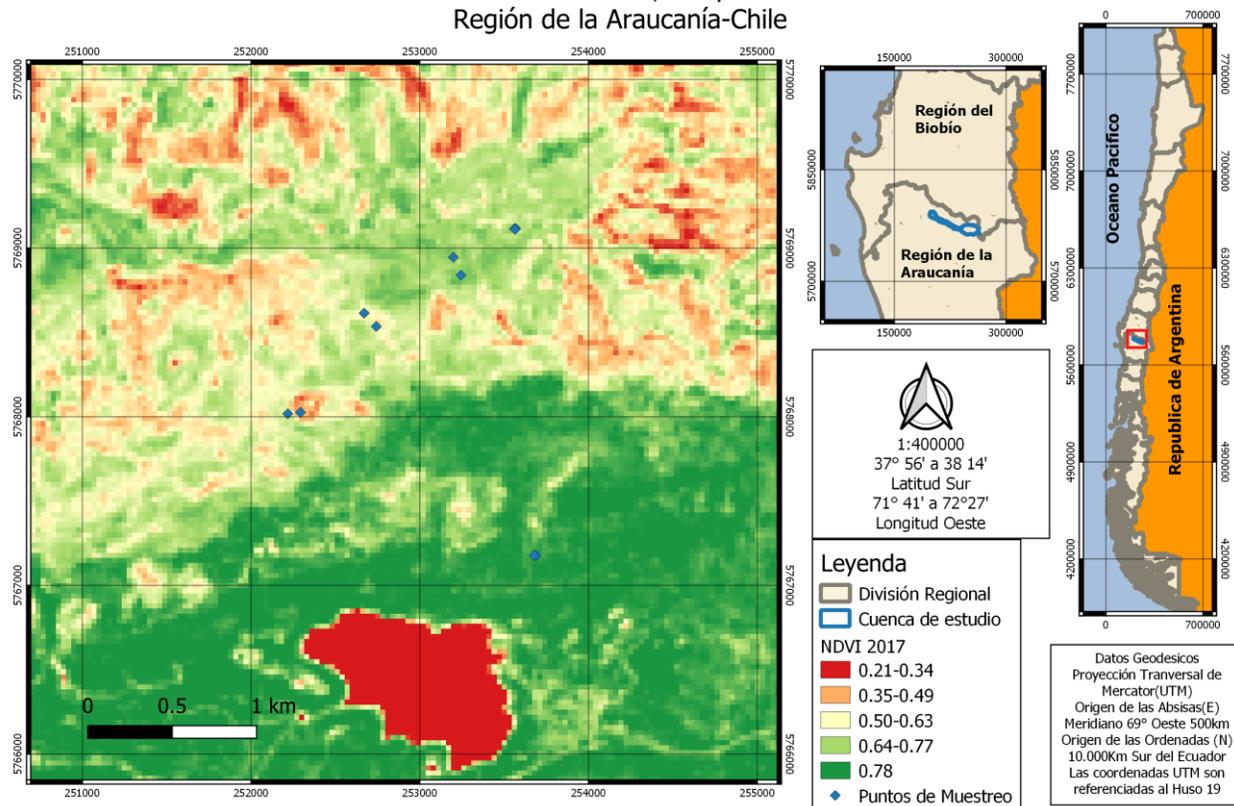


Figura 5-8 Sitios de pruebas de infiltración planificadas y muestreadas

En el anexo B se incluyen los gráficos y tablas de las tasas de descenso de nivel de las mediciones realizadas.

En la Tabla 5-1 se exhiben los valores obtenidos de conductividad hidráulica según la metodología disponible en el anexo B.

Tabla 5-1 Conductividad hidráulica de puntos muestreados

Conductividad Hidráulica Saturada	P02	P03	P04	P05	P06	P16	P07	P08	P09	P10
K_{fsG} [mm/día]	170,38	681,07	639,32	121,21	287,87	43,42	234,44	250,75	501,49	946,30
K_{fsL} [mm/día]	163,46	597,80	576,64	116,90	268,02	42,97	222,56	240,57	469,82	640,45
K_{fsRyE} [mm/día]	90,84	302,64	297,31	65,66	142,44	26,13	121,44	133,69	251,58	310,27

Nota: Acrónimos hacen referencia a la fórmula utilizada para calcular la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}).

Comparando los resultados obtenidos queda en evidencia que la igualdad de Reynolds y Erick (K_{fsRyE}) entrega resultados constantemente menores a las otras dos ecuaciones utilizadas, mientras que las igualdades de Laplace (K_{fsL}) y Golver (K_{fsG}) entregan resultados muy similares en la

mayoría de los puntos. En consecuencia, se promediaron estas últimas para obtener la conductividad hidráulica saturada de campo.

Finalmente, se interceptó la capa de severidad de quemado (dNBR) del año 2017 con los puntos donde se llevó a cabo las pruebas de infiltración. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5-2 y en la Figura 5-9.

Tabla 5-2 Conductividad hidráulica saturada y severidad de quemado de cada punto muestreado

	P02	P03	P04	P05	P06	P16	P07	P08	P09	P10
dNBR 2017 [-]	0,11	0,02	0,08	0,28	0,35	0,35	0,56	0,22	-0,02	-0,02
Ks Promedio [mm/día]	166,92	639,43	607,98	119,05	277,95	43,19	228,50	245,66	485,65	793,37

Se evidencia en la Figura 5-8 y la Tabla 5-2 que fue posible en la campaña de terreno caracterizar todos los grados de severidad de quemado con las mediciones realizadas.

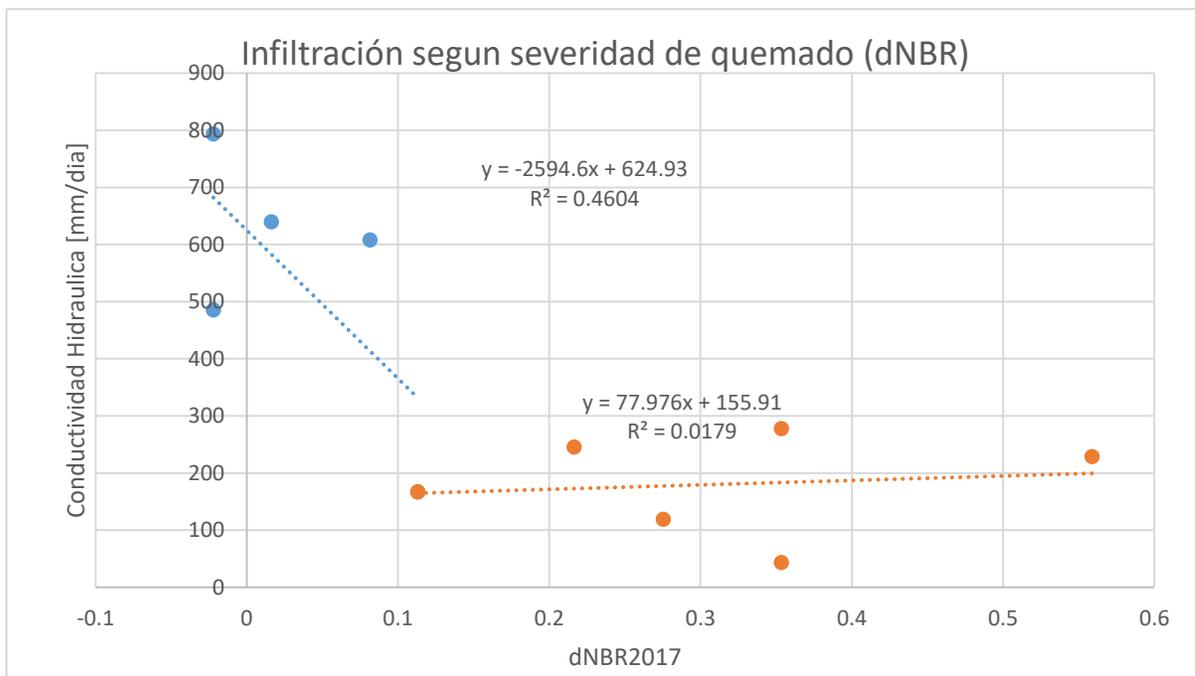


Figura 5-9 Conductividad hidráulica según severidad de quemado y aproximaciones para caracterizar la totalidad de la zona de estudio

Los resultados expuestos en Figura 5-9 dejan en evidencia que existe un descenso en la conductividad hidráulica en los sectores quemados; este descenso es muy abrupto antes del valor 0.1 de severidad de quemado, para posteriormente estabilizarse para severidades mayores. En general se reporta una diferencia de conductividad hidráulica de hasta un 95% entre un suelo no quemado y uno quemado.

Con los resultados obtenidos, se caracterizó la infiltración de la cuenca según el valor del coeficiente dNBR que posea el píxel en centroide de la grilla del modelo hidrológico.

5.3 Modelación hidrológica

En esta sección se presentan los resultados de las 6 modelaciones realizadas, incluyendo indicadores hidrológicos, comparación de curvas de variación estacional, serie de caudales y curvas de duración con respecto a lo registrado en la estación. Adicionalmente, se estudió la distribución espacial y temporal de los principales flujos. Finalmente, en esta sección se expone la variabilidad que se obtuvo de los parámetros calibrados.

Con el objetivo de presentar los resultados de forma más clara estos se dividirán en una sección de resultados de caudales medios diarios y otra con los caudales medios mensuales.

5.3.1 Caudales medios diarios

En esta sección se expondrán los resultados relacionados con los caudales medios diarios.

5.3.1.1 Ajuste de las modelaciones según indicadores KGE y NSE

En la Figura 5-10 se expone el rendimiento obtenido de la modelación calibrada mediante la metodología señalada anteriormente. Para cada una de las configuraciones realizadas.

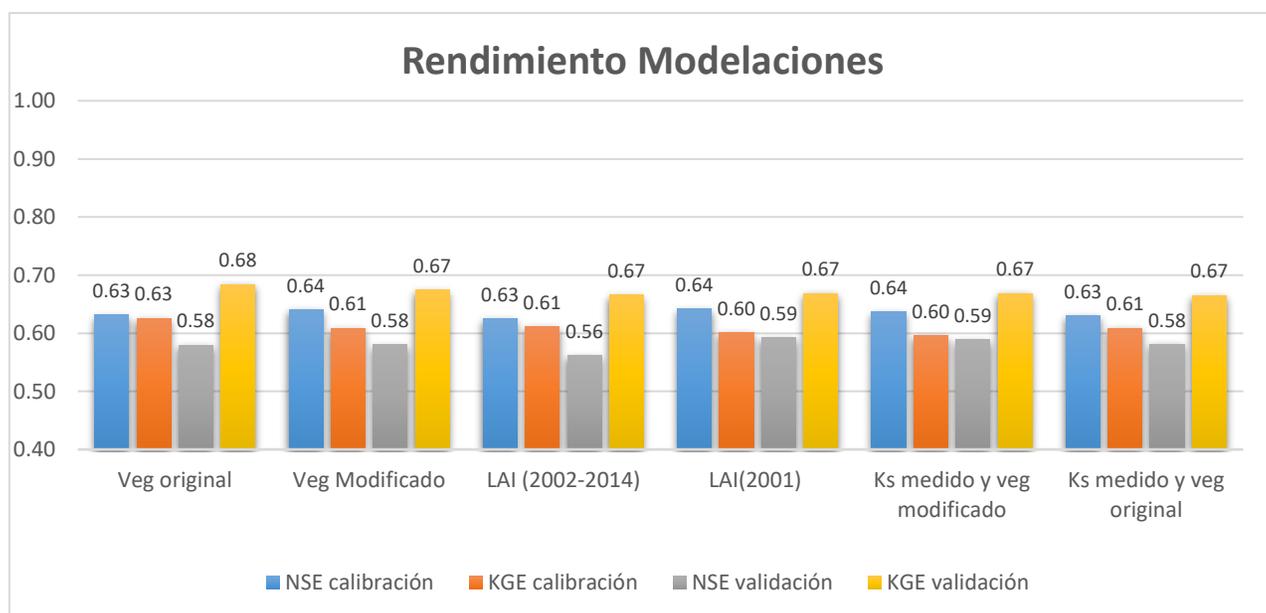


Figura 5-10 Rendimiento modelaciones en periodo de calibración y validación

Al observar los resultados de los indicadores de eficiencia utilizados para realizar la modelación hidrológica (KGE y NSE) es posible concluir que las modificaciones realizadas a cada una de las modelaciones no afecta de forma significativa el rendimiento notificado por estos coeficientes (Figura 5-10).

5.3.1.2 Comparación de caudal observado y simulado

En esta sección se expone el ajuste del modelo con respecto a lo observado con una escala temporal diaria (Figura 5-11). Posteriormente se expone la variación del caudal para el periodo de calibración y validación (Figura 5-12), en el anexo C se adjuntan la variación temporal de los demás flujos exportados (evaporación, fracción de cobertura nival, SWE y la humedad de suelo).

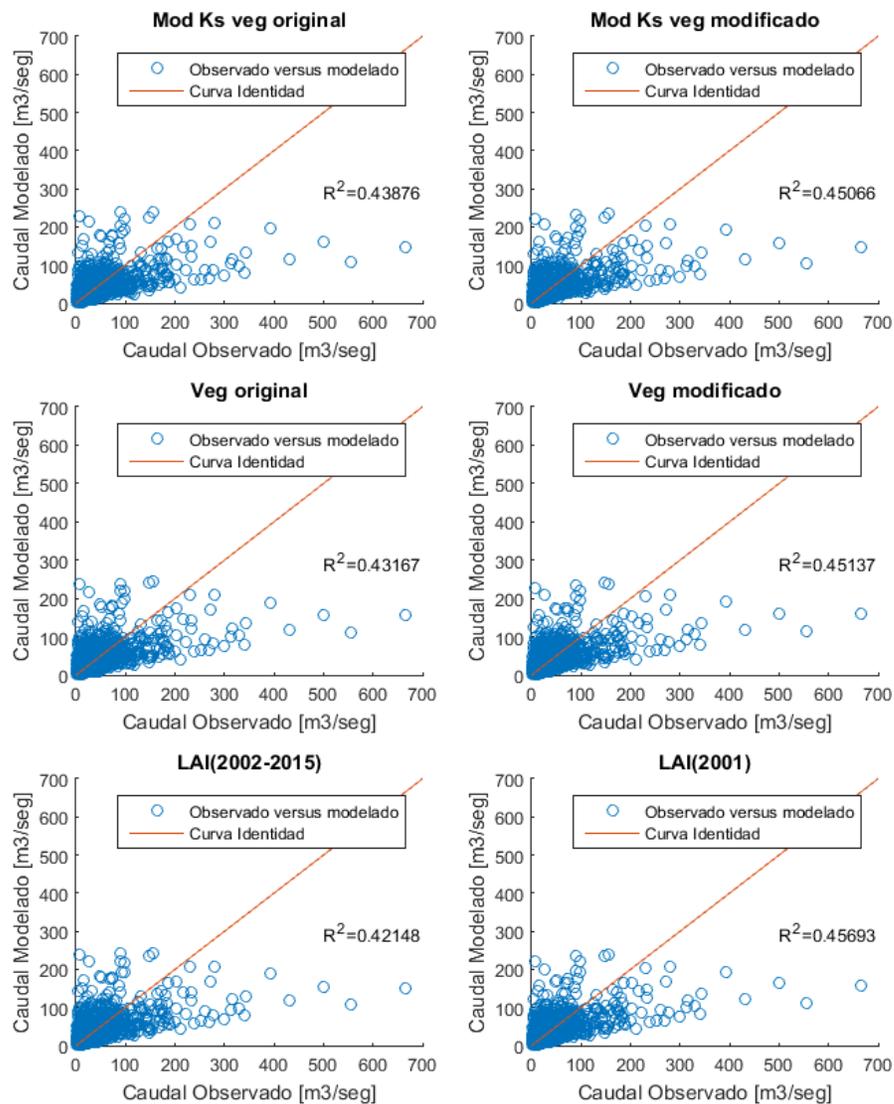


Figura 5-11 Caudal Observado versus modelado escala diaria

Al comparar caudales modelados versus observados a escala diaria queda en evidencia que existe una gran desviación entre ambos, con una subestimación de los caudales altos (Figura 5-11).

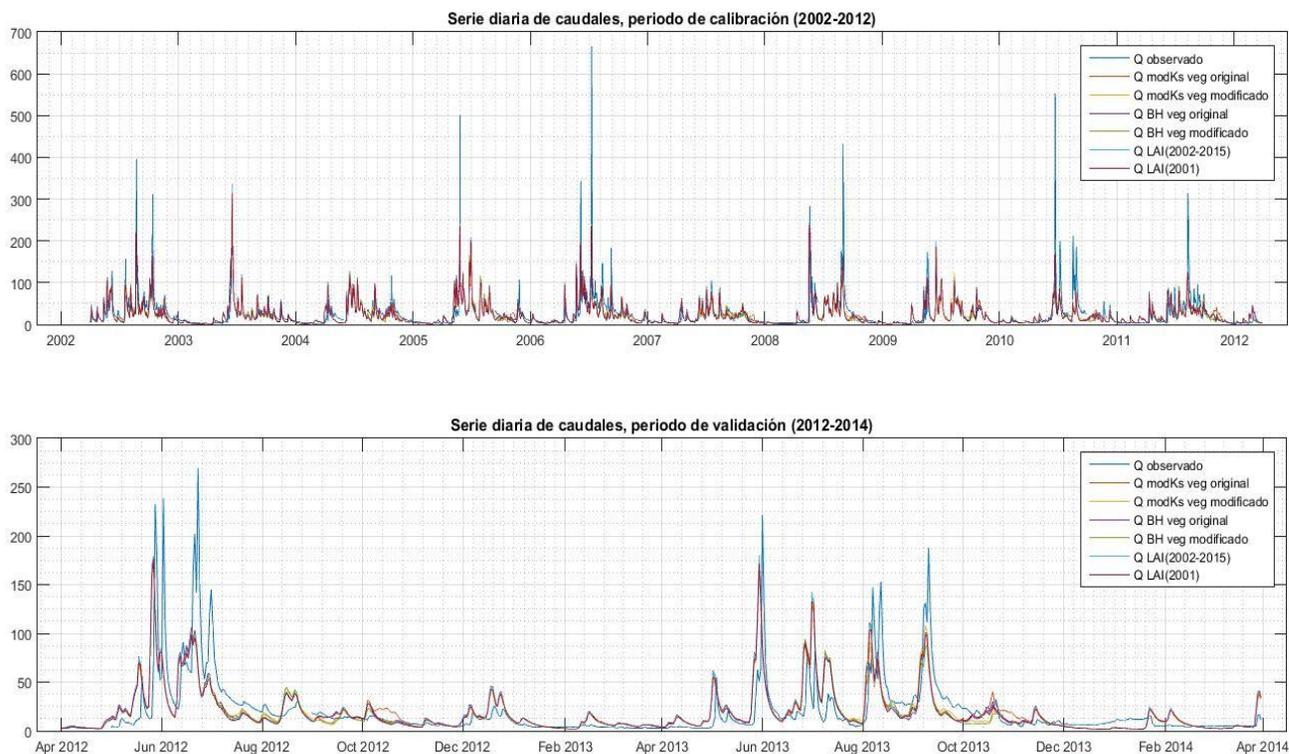


Figura 5-12 Serie diaria de caudales, periodo de calibración (superior) y validación (inferior)

Al analizar la serie total de caudal diario (Figura 5-12) se observa que el caudal modelado en todas las configuraciones tiende a subestimar las crecidas y en la etapa de recesión posterior a una crecida tiende a sobrestimar levemente los caudales. Adicionalmente, se observa un retardo de aproximadamente de 2 días en la modelación. Esta situación se agrava en el periodo de validación donde el retardo puede llegar a ser 3 a 4 días.

Todas las configuraciones de modelación tienen un comportamiento similar, diferenciándose en la magnitud de los caudales. Las configuraciones LAI (2002-2015) y veg original poseen una mayor magnitud en gran parte de las crecidas. En la zona posterior al peak se observa que la configuración que decae más rápidamente corresponde a la configuración de LAI (2002-2015).

5.3.2 Caudales medios mensuales

En la siguiente sección se exponen los resultados obtenidos con la serie de datos de caudales medios mensuales.

5.3.2.1 Caudal observado versus modelado

En esta sección se expone los resultados obtenidos del modelo con respecto a lo observado en términos del caudal medio mensual para todo el espectro temporal de modelación (Figura 5-13).

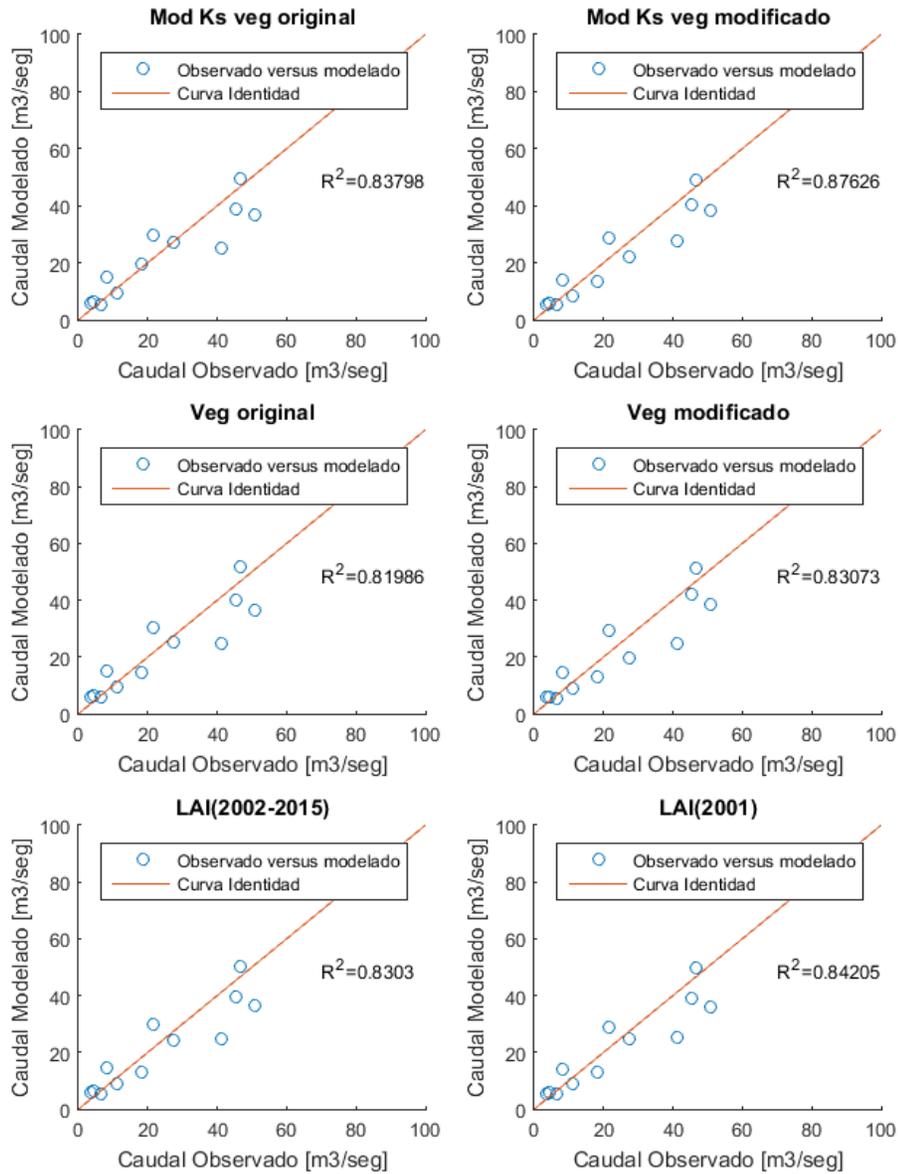


Figura 5-13 Comparación de caudal medio mensual observado y modelado

Al promediar los resultados a nivel mensual, se presenta un fuerte incremento en el rendimiento de la modelación (Figura 5-13), alcanzándose valores de R^2 superiores a 0,8.

5.3.2.2 Curvas de variación estacional

En la Figura 5-14 se presenta la variación estacional de los caudales en la zona de estudio para el periodo de calibración y validación, respectivamente.

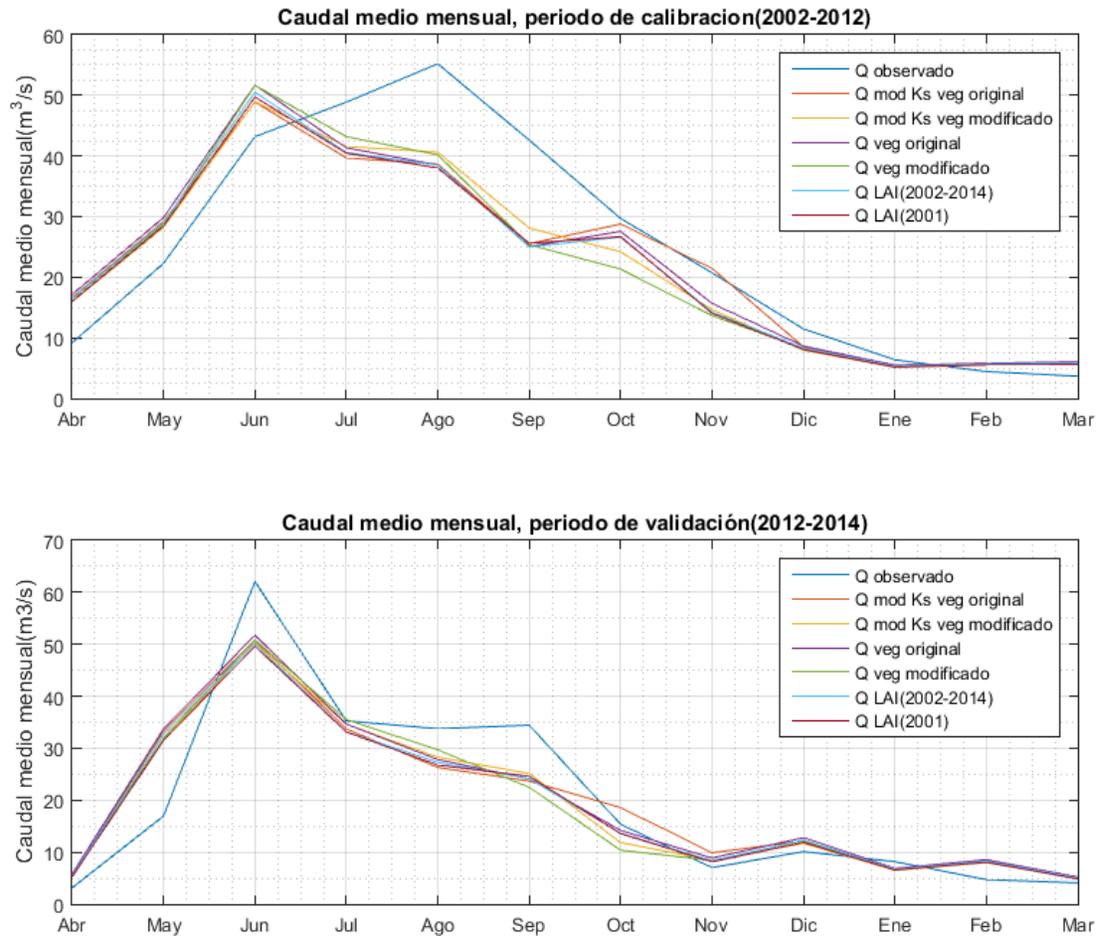


Figura 5-14 Curvas variación estacional periodo de calibración y validación

La curva de variación estacional en el periodo de calibración (2002-2012) presenta en las observaciones un peak en el mes de agosto. Lo que no es posible de modelar con ninguna de las configuraciones. En general, todas las modelaciones presentan una sobrestimación los meses de abril, mayo y junio. Por otra parte, los meses posteriores (julio, agosto, septiembre) se observa una clara subestimación de los caudales.

Por otra parte, la curva de variación estacional en la validación (2012-2014) tiene un mejor ajuste debido a la ausencia del peak en el mes de agosto. De todas formas, se observa que en los meses de abril y mayo la modelación tiende a sobrestimar el caudal, mientras que los meses de junio, agosto y septiembre se presenta una subestimación.

La modelación con el peak más alto los meses de invierno corresponde a la “veg original”, la cual presenta los caudales más altos entre los periodos de abril a junio y de diciembre a marzo. Entre junio a diciembre las modelaciones de mayor caudal medio corresponden a “veg modificado” entre junio a agosto, “mod Ks veg modificado” entre agosto y septiembre y finalmente “mod Ks veg

original” entre los meses de septiembre a diciembre. El mes donde se presenta mayor dispersión entre las distintas modelaciones realizadas corresponde al mes de octubre.

5.3.2.3 Curvas de duración

Siguiendo la metodología expuesta en la sección 4.4.2 se obtuvieron resultados que se muestran en la Figura 5-15.

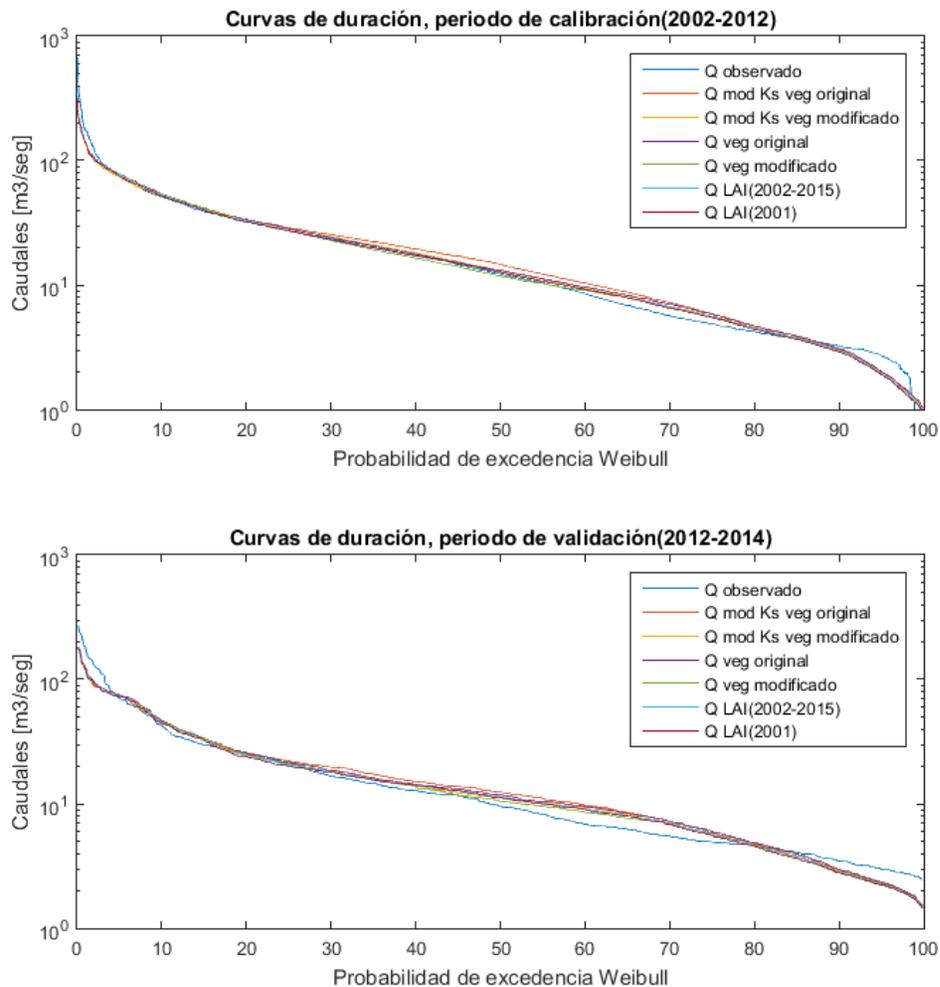


Figura 5-15 Curva de duración para los periodos de calibración y validación

En general se observa un buen ajuste entre el caudal observado y modelado en la curva de duración para el periodo de calibración. Tanto para el periodo de calibración y validación se observa que los caudales bajos y altos son subestimados por todas las modelaciones. Por otra parte, se aprecia una leve desviación de lo observado con respecto a lo modelado en el segmento medio de la curva de

duración, específicamente entre el 60% y el 80% para el periodo de calibración y entre 50% y el 78% de probabilidad de excedencia.

5.3.3 Balance hídrico

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en este estudio con los obtenidos en el proyecto de la actualización del balance hídrico nacional presentado en la sección 2.2.2. Considerando una precipitación media anual en la cuenca de 2018 mm, se elaboró el mismo balance realizado con los resultados de los experimentos (Tabla 5-3).

Tabla 5-3 Balance hídrico y almacenamiento asociado. Valores obtenidos entre 01/04/2002 y 31/03/2014

Modelación	Escorrentamiento [mm/año]	Evapotranspiración [mm/año]	Error
Mod Ks Veg original	1699,4	252,16	3,29%
Mod Ks Veg modificado	1651,9	300,74	3,24%
Veg original	1693,1	259,12	3,26%
Veg modificado	1646,4	306,87	3,21%
LAI(2002-2015)	1649,9	303,35	3,21%
LAI(2001)	1632,1	321,47	3,19%

Las modelaciones que consideran el efecto que tiene el fuego en la vegetación presentan valores menores en la evapotranspiración y mayores en la escorrentía que sus pares que no lo consideran. Se presenta una disminución de entre 5.6-16.2% para la evapotranspiración y un aumento entre 1.1%-2.9% en la generación de la escorrentía. Por otra parte, la modelación que más escorrentía presenta corresponde a “Mod Ks veg original” con un valor de 1699,4 mm /año, esta modelación también presenta la menor evapotranspiración con un total anual de 252mm/año.

En promedio se obtiene una escorrentía 1,6% mayor y una evapotranspiración 35,8% menor a la reportada por la actualización del balance hídrico nacional (Vargas et al., 2018). Mientras que en términos del error de balance es 1,2% mayor.

5.3.4 Indicadores hidrológicos

En los siguientes recuadros se presenta el ajuste que se registró en la modelación en los periodos de calibración (Figura 5-16) y validación (Figura 5-17).

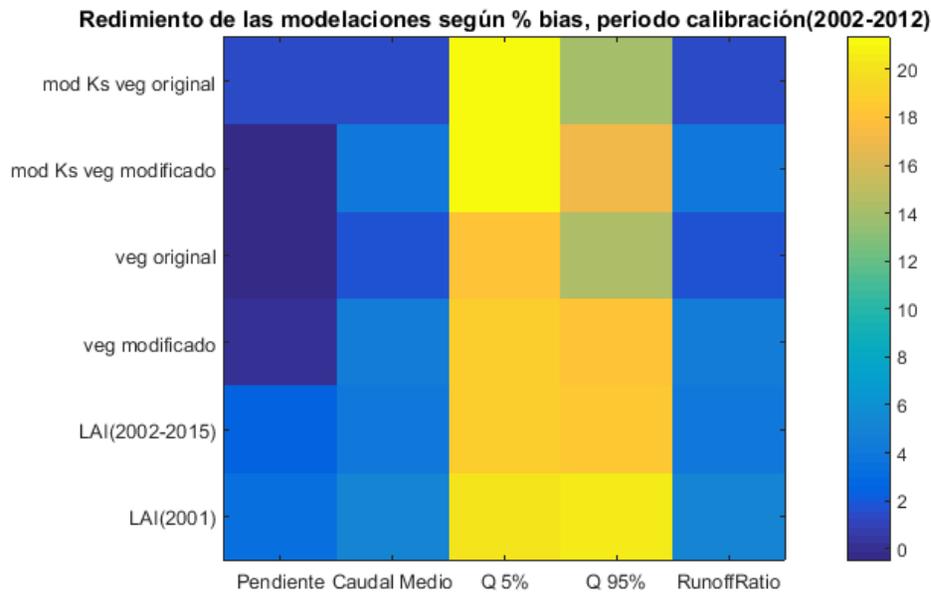


Figura 5-16 Rendimiento modelaciones según indicadores hidrológicos, periodo de calibración

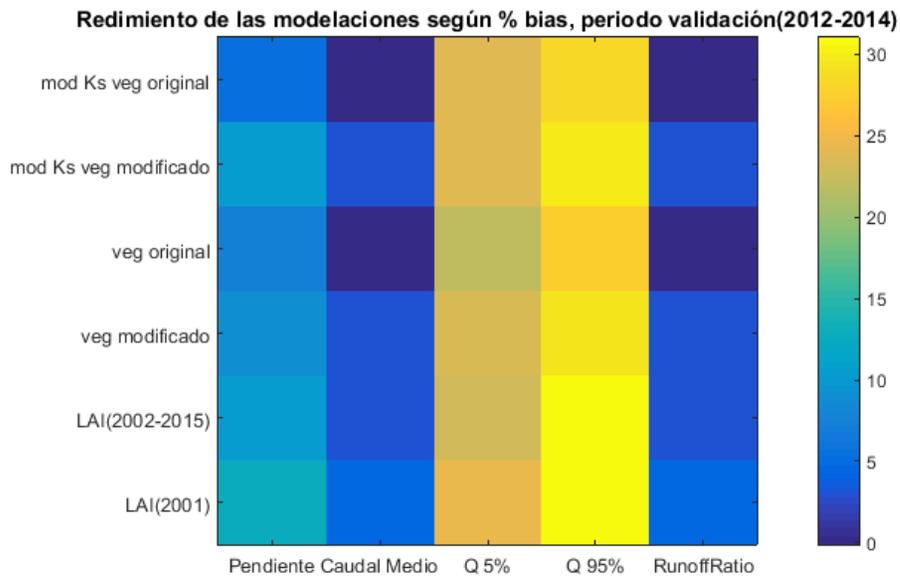


Figura 5-17 Rendimiento modelaciones según indicadores hidrológicos, periodo de validación

Se observa que, en general, todas las configuraciones presentan un buen ajuste en términos de la pendiente del sector medio, caudal medio y el coeficiente de escorrentía con un % bias de entre 0-5 % con respecto a lo observado. De forma contraria las modelaciones presentan grandes errores en los caudales bajos (Q₅) y altos (Q₉₅), % bias de 14-30 %. En este análisis queda en evidencia que comparativamente existe un mejor ajuste para las modelaciones que consideran la vegetación quemada en la zona, presentando una mejora constante en todos los indicadores entre 1-3 %.

5.3.5 Distribución espacial de flujos

En esta sección, se analizan los flujos distribuidos espacialmente, los que fueron normalizados por la precipitación del pixel respectivo, con el objetivo de estudiar cómo se comporta el modelo frente a las distintas configuraciones de variables de entrada. Es importante mencionar que estos resultados corresponden al promedio de todo el periodo de análisis (2002-2014). Los resultados se presentan entre la Figura 5-18 y la Figura 5-24. En el Anexo D se adjunta la distribución espacial de humedad de los tres estratos de suelo.

5.3.5.1 Evaporación total

En la siguiente sección se presentan los resultados de evaporación total normalizada por la precipitación, promedio para todo el periodo de modelación (2002-2014).

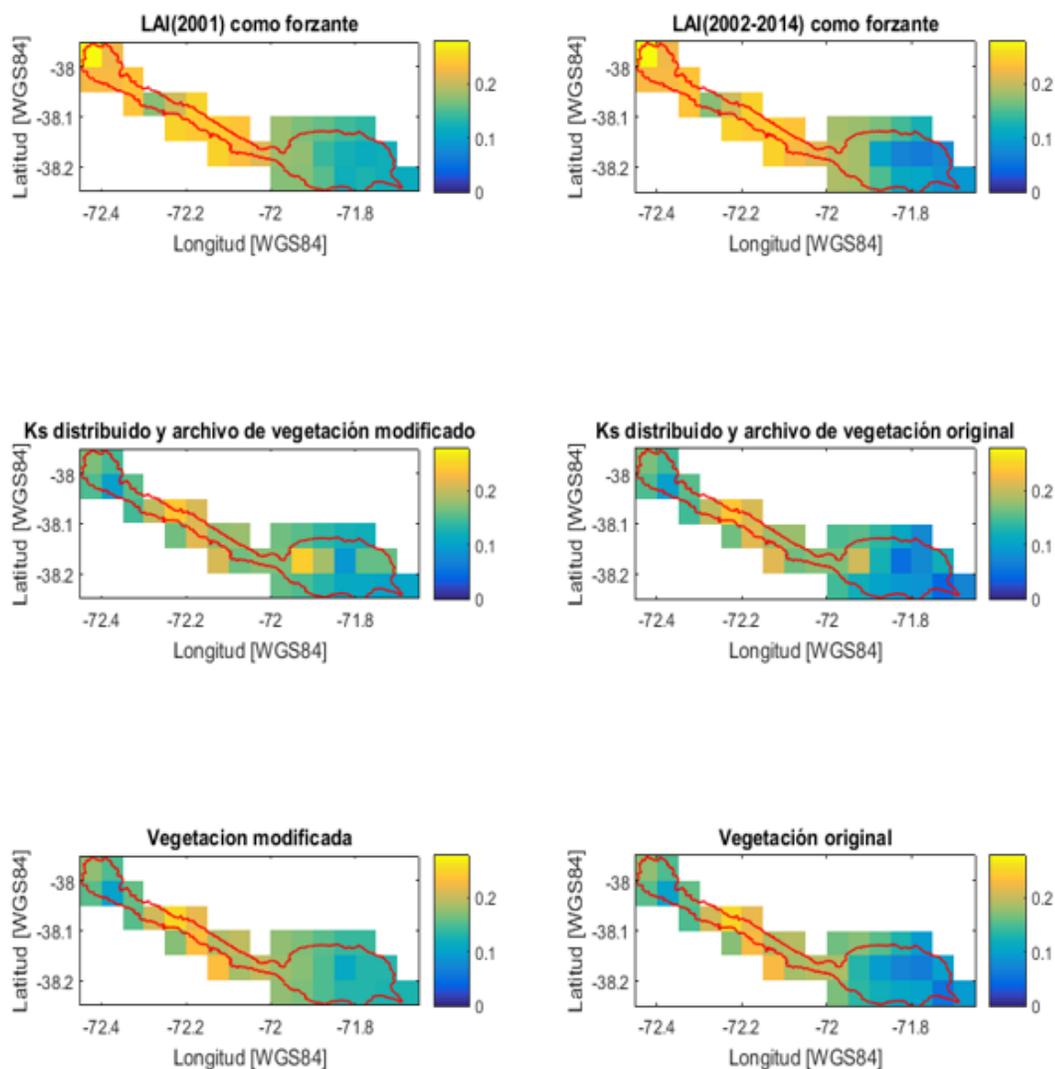


Figura 5-18 Evapotranspiración total normalizada por la precipitación [-]

En la Figura 5-18 se observa que una de las diferencias entre las modelaciones corresponde al incremento en la evapotranspiración localmente en las celdas donde se modificaron los valores de conductividad hidráulica (mod Ks), mostrando un incremento en la evaporación total localmente en estas celdas. Esto se debe a que al presentar menores valores de conductividad hidráulica la infiltración hacia capas profundas es menor, resultando en un aumento del contenido de agua en las capas superiores haciendo posible un aumento en la evapotranspiración. Por otra parte, los resultados obtenidos con las librerías de vegetación y el LAI como forzante son bastante similares en su distribución espacial.

En la Tabla 5-4 se presenta el promedio espacial para todos los pixeles que componen la cuenca, donde queda en evidencia que la modelación que más evaporación total presenta corresponde a “LAI (2001)” y la que menor es la “mod Ks veg original”.

Tabla 5-4 Evaporación total normalizada por la precipitación por la fracción de cada pixel, promedio para toda la cuenca

Modelación	Evaporación total/precipitación [-]
LAI (2001)	0,085
LAI(2002-2014)	0,081
Mod Ks veg modificado	0,074
Mod Ks veg original	0,065
Veg modificado	0,076
Veg original	0,068

En general todas las modelaciones tienen una disminución en su evapotranspiración entre 16% y 44% con respecto a su par que no considera el efecto del incendio en la vegetación. La distribución espacial de esta información se expone en la Figura 5-19. Esta comparación deja en evidencia que en términos promedios (Tabla 5-4) existen leves diferencias entre los resultados de modelaciones que consideran el Ks distribuido y la librería de vegetación, ya que ambas modelaciones utilizan las mismas diferencias en la librería de vegetación. Mientras que la modelación utilizando el LAI variable utiliza otra metodología para caracterizar el efecto del incendio forestal en la vegetación.

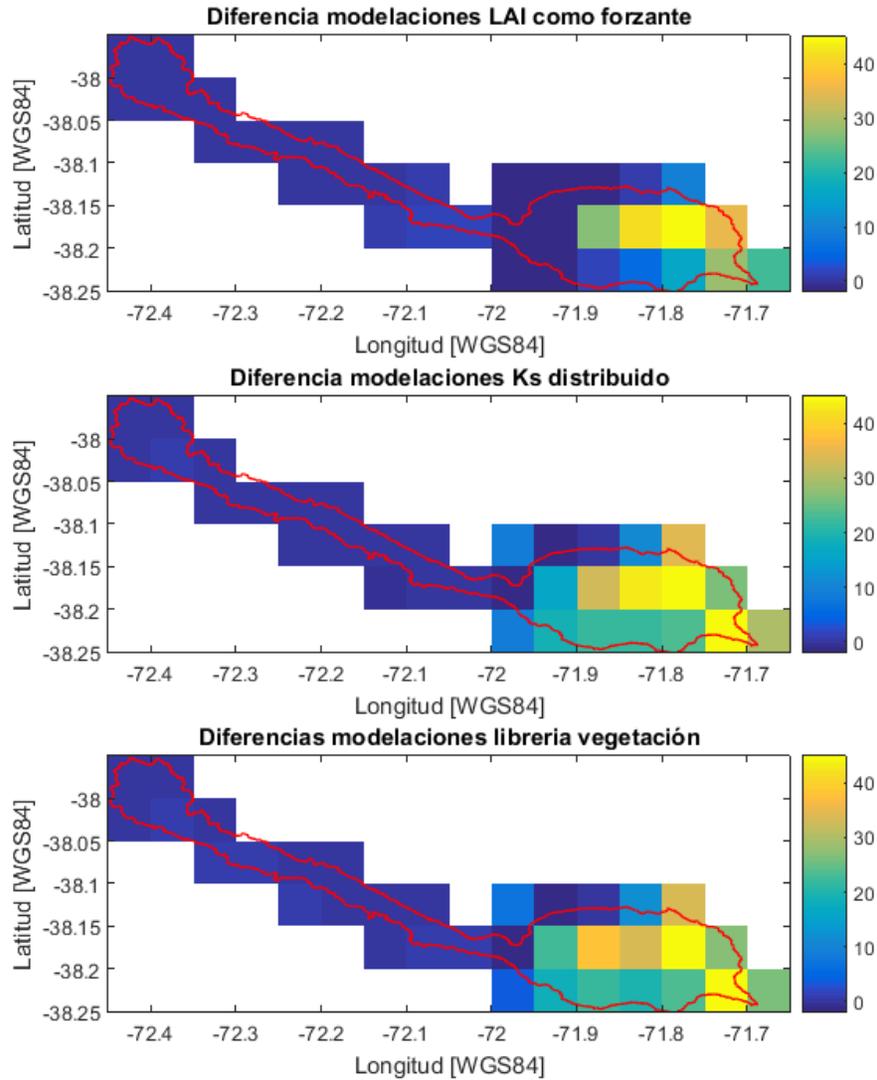


Figura 5-19 Diferencia porcentual de la evaporación normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI variable en el tiempo (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal.

5.3.5.2 Escorrentía directa

En la siguiente sección se exponen la distribución espacial de la escorrentía directa normalizada por la precipitación promedio para todo el periodo de modelación (2002-2014).

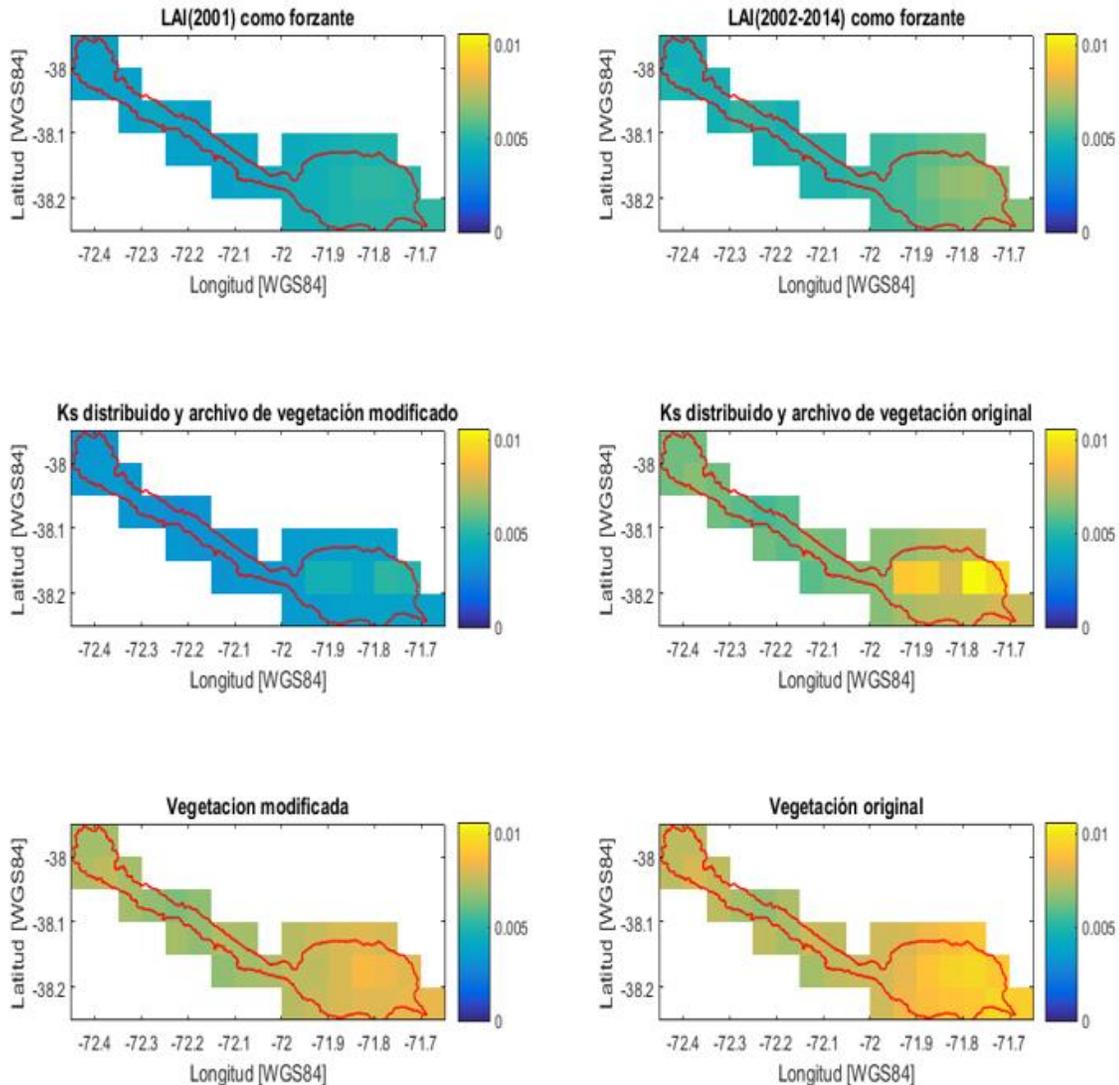


Figura 5-20 Escorrentía directa normalizada por la precipitación [-]

Al analizar los resultados expuesto en la Figura 5-20 queda en evidencia que las modelaciones que consideran el efecto del incendio forestal en la vegetación presentan una mayor generación de escorrentía. Particularmente la modelación “mod Ks veg original” presenta un alto incremento con respecto a su par que no considera el efecto del incendio forestal (“mod Ks veg modificado”), este incremento es altamente significativo en los pixeles donde se modificó la conductividad hidráulica. En la Tabla 5-5 a continuación se presenta el promedio espacial que deja en evidencia lo anteriormente mencionado. Seguidamente se expone la diferencia espacial entre las modelaciones que consideran y no el efecto del incendio en la vegetación (Figura 5-21).

Tabla 5-5 Escorrentía normalizada por la precipitación y por la fracción de cada pixel, promedio para toda la cuenca

Modelación	Escorrentía/precipitación [-]
LAI (2001)	0,0021
LAI(2002-2014)	0,0026
Mod Ks veg modificado	0,0017
Mod Ks veg original	0,0033
Veg modificado	0,0035
Veg original	0,0038

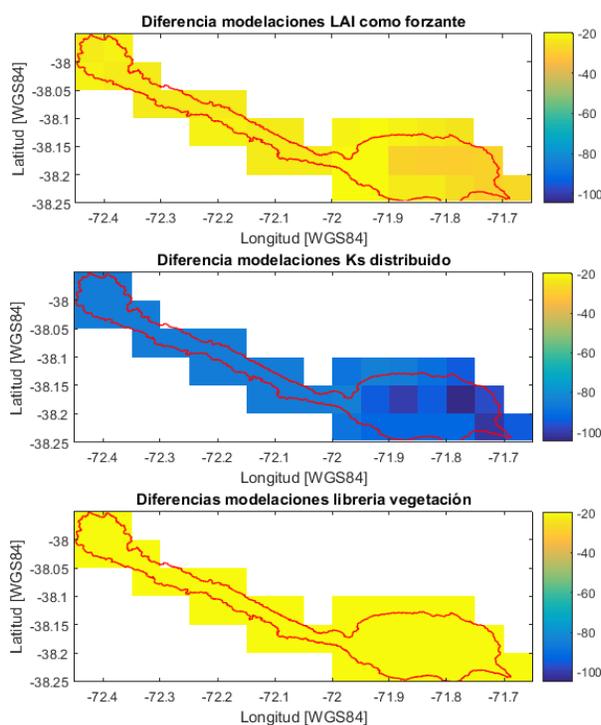


Figura 5-21 Diferencia porcentual de la escorrentía normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI como forzante (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal

5.3.5.3 Cobertura nival

En la siguiente sección se expone la distribución espacial de la cobertura nival normalizada por la precipitación para todo el periodo de modelación (Figura 5-22).

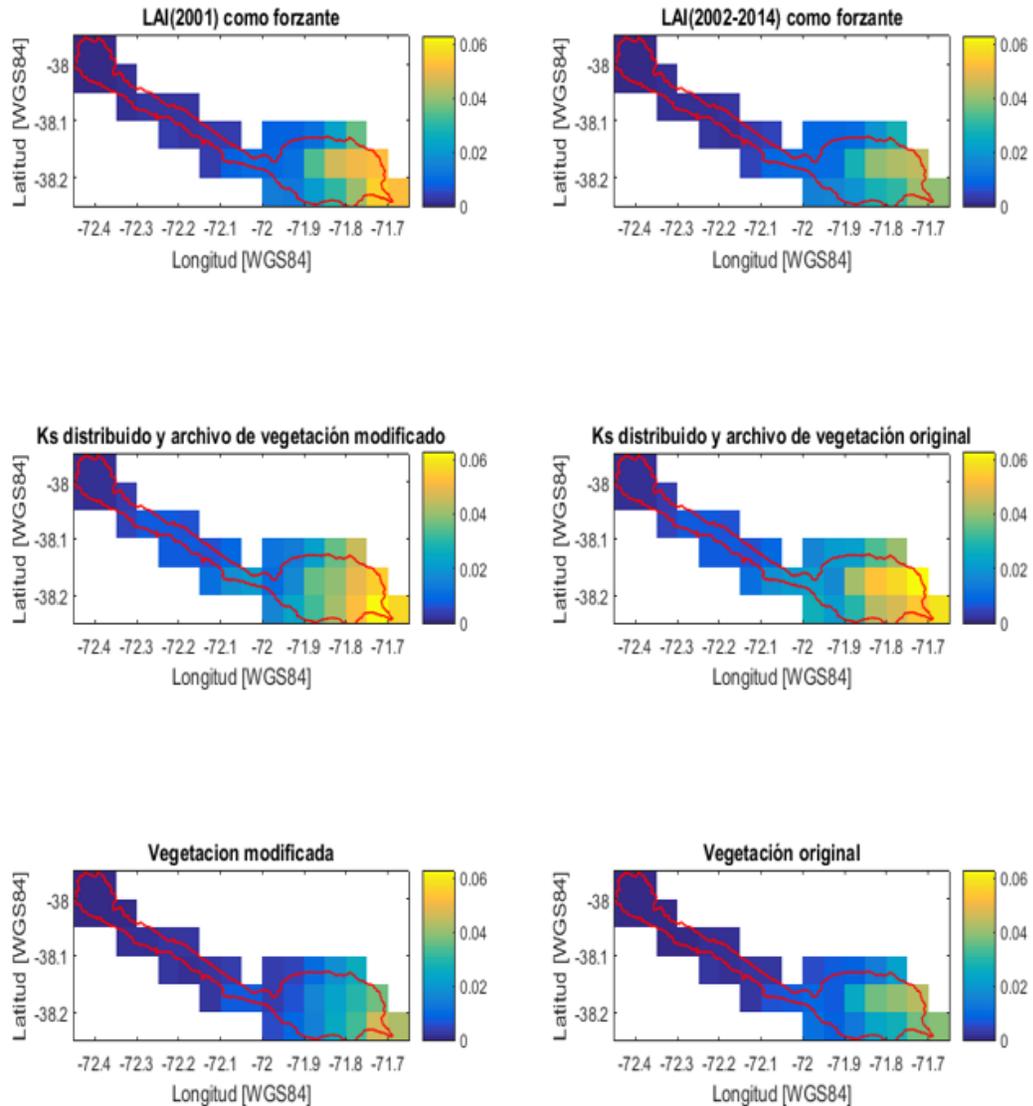


Figura 5-22 Cobertura nival normalizada por la precipitación [-]

La Figura 5-22 refleja lo esperado ya que la cobertura de nieve se concentra en las zonas altas. En general todas las modelaciones tienen un comportamiento muy similar al analizar la cobertura nival. Al comparar las variaciones entre considerar el efecto del fuego en la vegetación queda evidenciado que las modelaciones que utilizan el Ks distribuido y librería de vegetación experimentan un desplazamiento de la línea de nieve. Esto debido a que los pixeles más bajos en la situación que si se considera el incendio tienen cobertura nival (lat -38,2 al -38,1; lon -72), mientras al no considerarlo no se presenta nieve en esos pixeles (Figura 5-23).

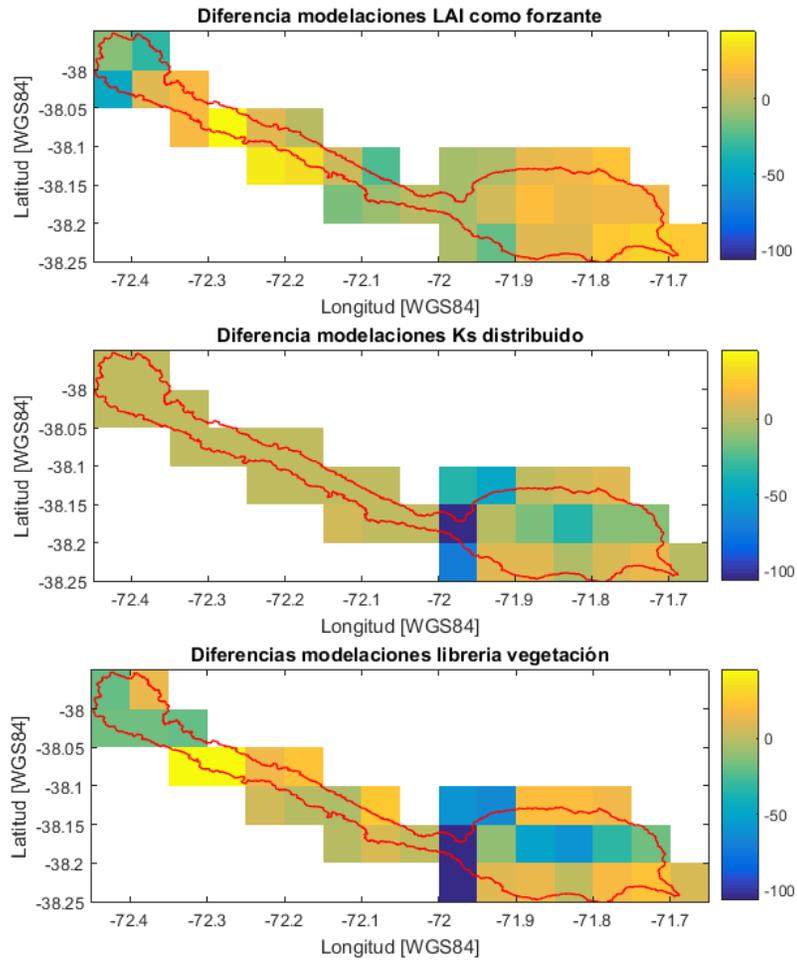


Figura 5-23 Diferencia porcentual de la cobertura nival normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI como forzante (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal.

5.3.5.4 Equivalente de nieve en agua (SWE)

En el siguiente apartado se expone la distribución espacial del SWE normalizado por la precipitación, promedio para todo el periodo modelado (Figura 5-24).

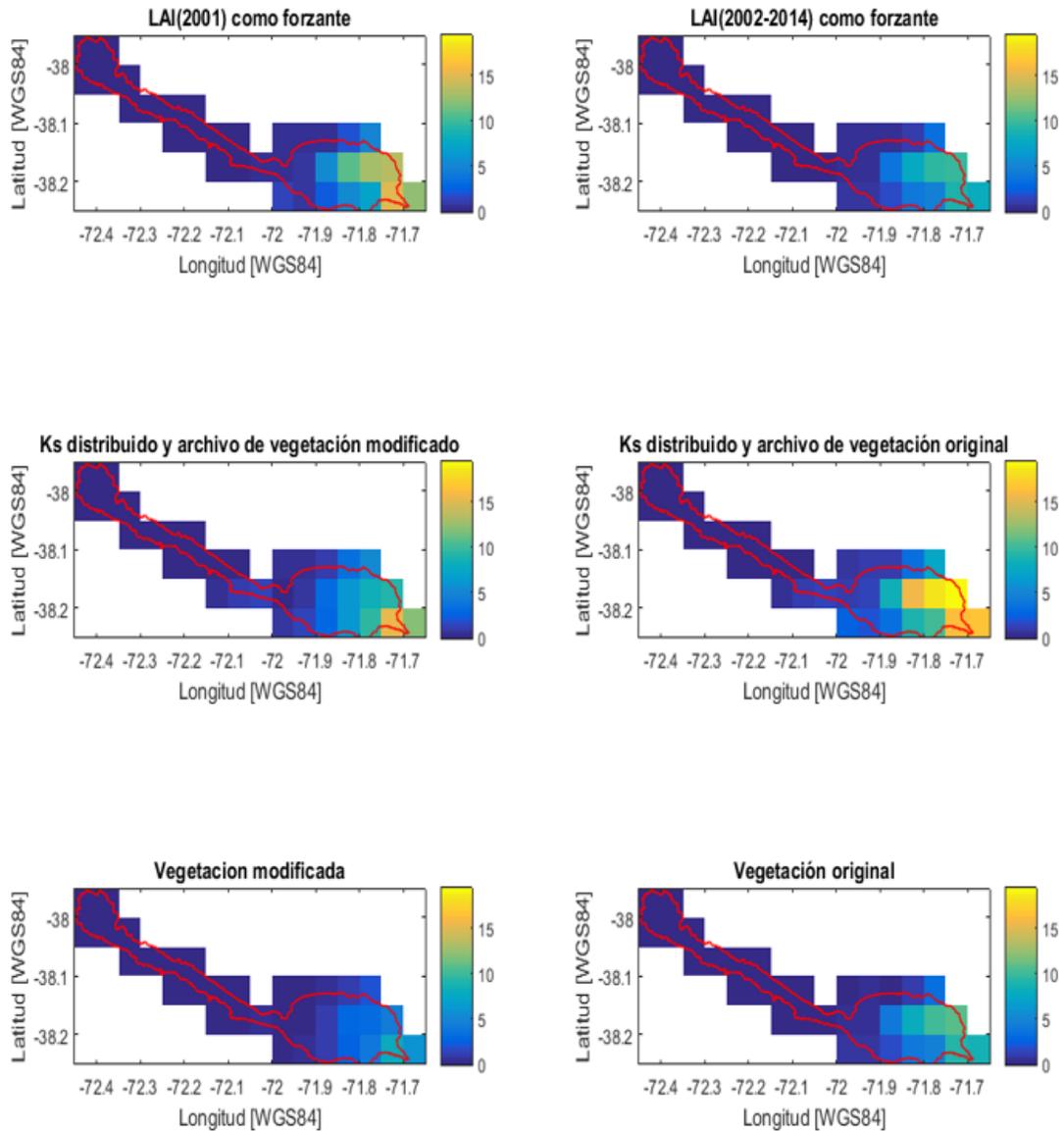


Figura 5-24 SWE normalizado por la precipitación [-]

El comportamiento del equivalente de nieve en agua tiene un comportamiento muy similar a la cobertura nival, revelando el mismo ascenso de la línea evidenciado en la sección anterior (Figura 5-25).

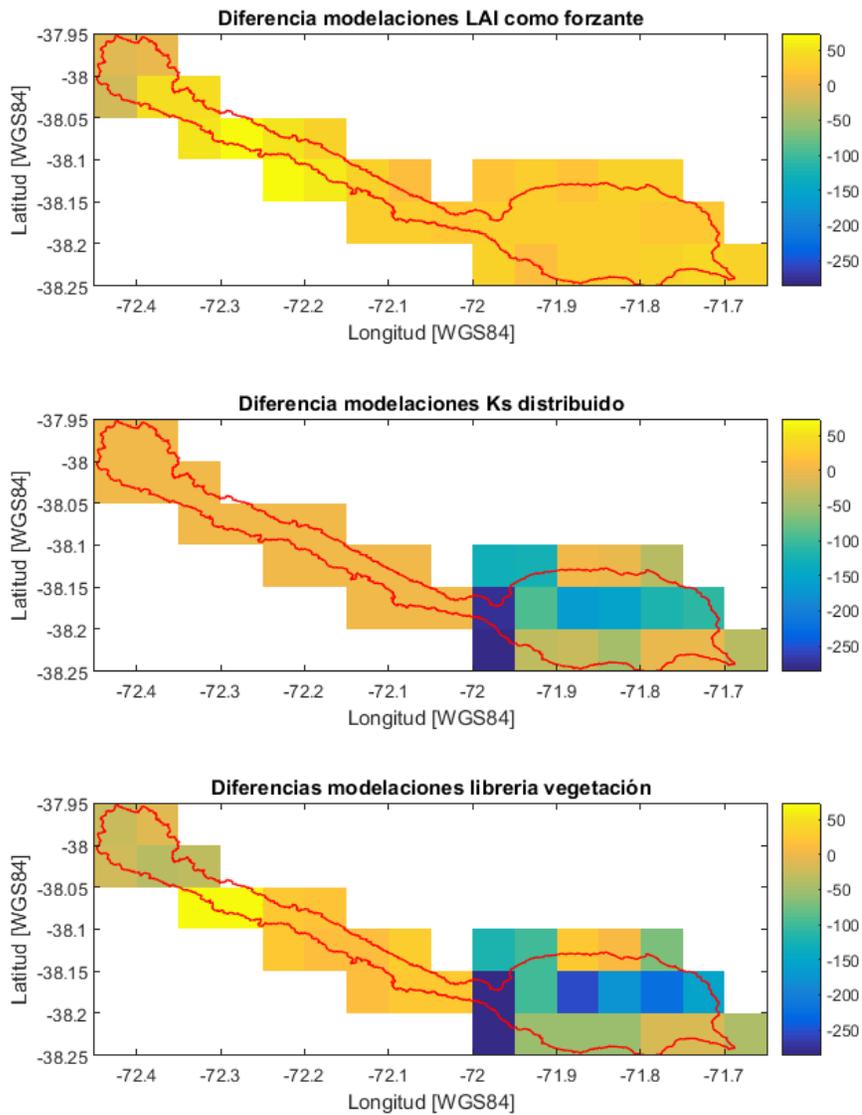


Figura 5-25 Diferencia porcentual de SWE normalizada por la precipitación entre las modelaciones [%]. Imagen superior corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan el LAI como forzante (LAI 2001 y LAI 2002-2014). La figura central corresponde a la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de las mediciones de infiltración utilizando la clasificación de vegetación original de Zhao et al. (2016) y el catastro de vegetación modificado. Finalmente, la imagen inferior expone la diferencia entre las modelaciones que utilizan la información de la clasificación vegetal realizada por Zhao et al. (2016) y la clasificación vegetal considerando el incendio forestal.

5.3.6 Variación de parámetros calibrados

La variación de los 11 parámetros calibrados se presenta en la Figura 5-26 y Figura 5-27 para las 10 mejores modelaciones entregados por el SCE-UA de cada configuración de modelación realizadas.

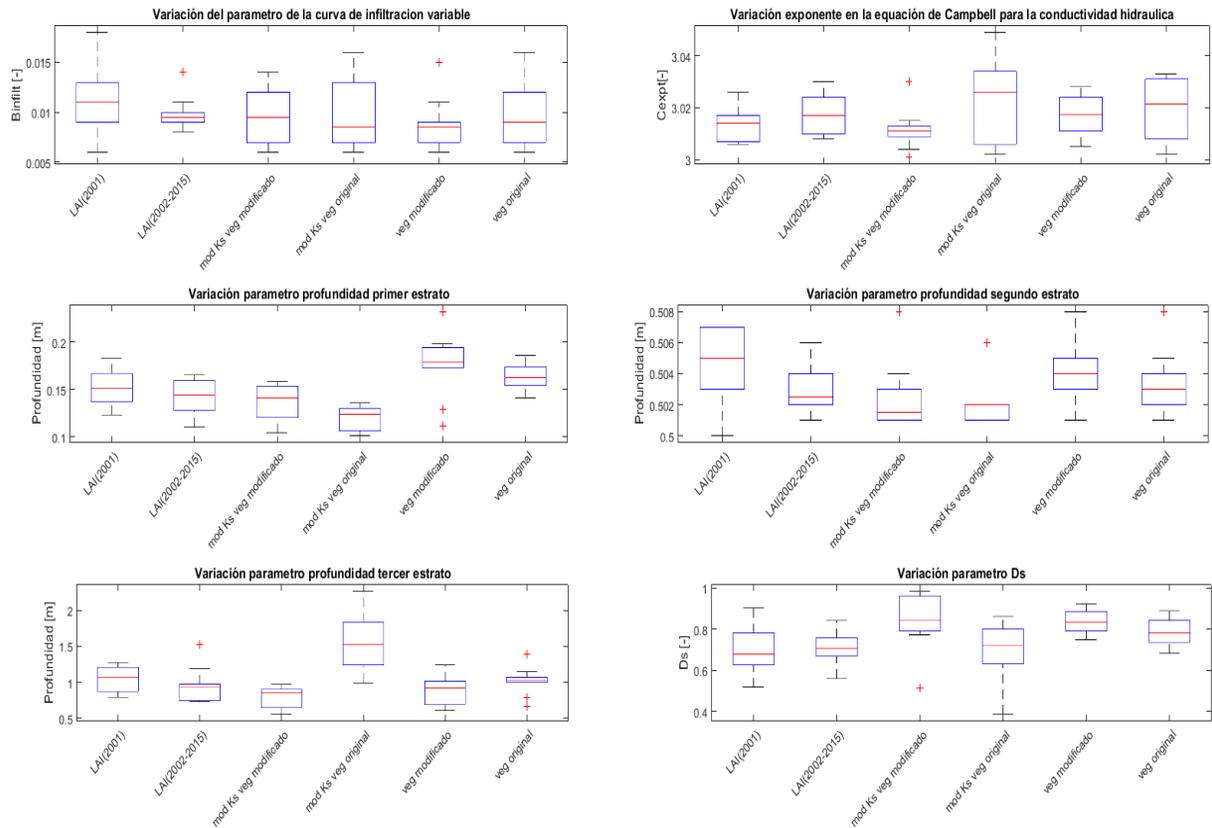


Figura 5-26 Variación de parámetros calibrados

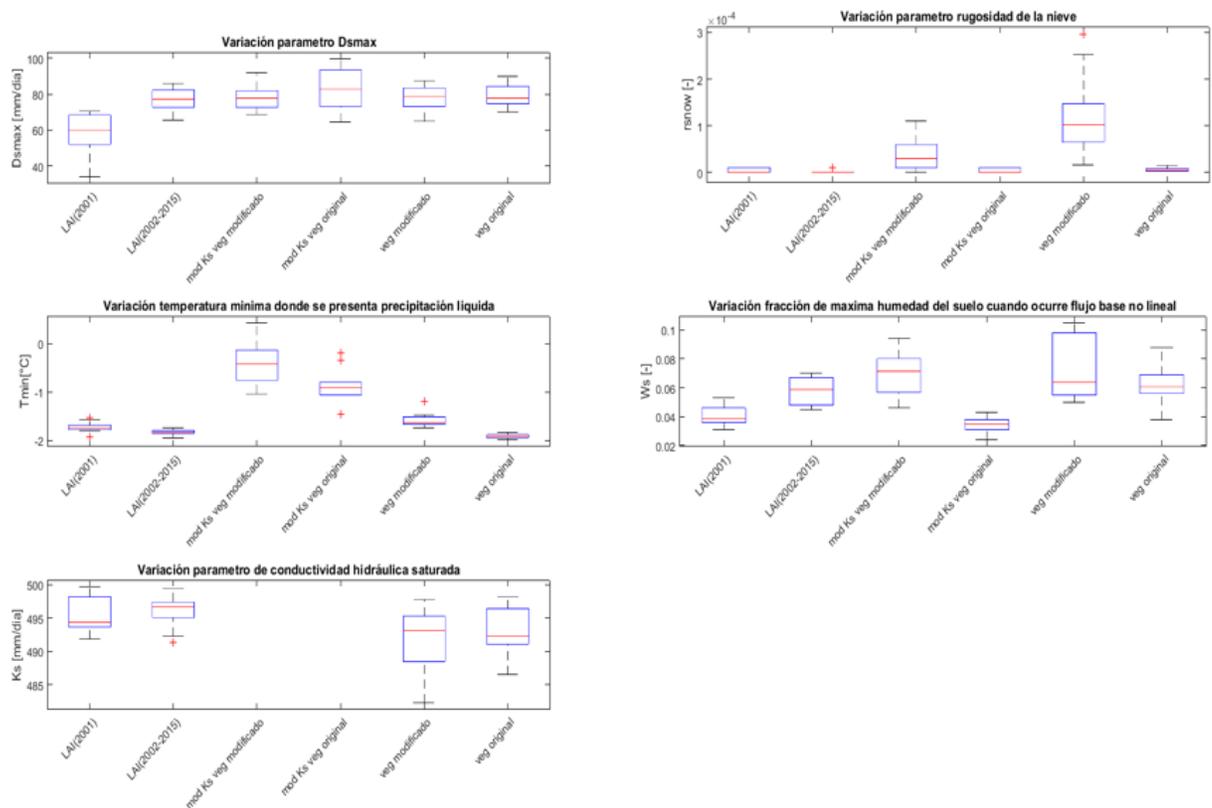


Figura 5-27 Continuación, variación de parámetros calibrados

Los resultados expuestos en esta sección dejan en evidencia que existen parámetros que tienen gran variabilidad en las modelaciones como es el caso de T_{min} , mientras otros parámetros tienen una baja variabilidad como es el caso del exponente de la ecuación de Campbell (C_{exp}).

Los resultados del parámetro T_{min} muestran que en las modelaciones que se modificó la conductividad hidráulica, especialmente la cual tiene la librería de vegetación modificada se presentan consistentemente mayores valores de T_{min} . Significando en términos prácticos, una menor cantidad de precipitación en forma de nieve en la cuenca.

Al analizar los resultados de la profundidad de los estratos, se observa que en los experimentos que no consideran el efecto del incendio en su vegetación (LAI(2001), Veg modificado) se obtuvo una mayor profundidad en el primer y segundo estrato con respecto a su par que si considera este efecto en la vegetación (LAI(2002-2014), Veg original). Esto no es tan claro en los resultados de la segunda capa en los experimentos que consideran las mediciones de infiltración ya que en términos promedios se observan resultados muy similares en ambas configuraciones, no así en los resultados de la primera capa. Finalmente, la profundidad del tercer estrato adopta valores muy similares en todos los experimentos, con la excepción de la modelación que utiliza la información de las mediciones de conductividad hidráulica y la librería de vegetación original, la cual presenta un incremento de más 0,5 metros con respecto a todos los demás experimentos.

Capítulo 6: Conclusiones y comentarios finales

En el presente capítulo, se presentan las conclusiones y comentarios finales del trabajo separado por tema:

6.1 Conclusiones

La cuenca seleccionada para llevar a cabo este estudio presenta la ventaja que el área afectada por el incendio forestal se encuentra totalmente contenida en el Parque Nacional Tolhuaca, y por lo tanto es posible asegurar la existencia de flora nativa anterior al incendio forestal y detectar de forma clara el efecto del incendio mediante productos satelitales. Esta tarea se complejiza cuando existe desforestación producto a la acción humana, ya que la detección de la severidad de quemado se ve fuertemente influenciada por este tipo de deterioro.

Una de las desventajas de la cuenca seleccionada corresponde a la razón entre el área quemada versus el área total de la cuenca, la cual corresponde a un 25% aproximadamente. Esta razón puede estar influenciando de gran manera los resultados obtenidos, considerando que no se obtuvo una gran diferencia en términos de los coeficientes de rendimiento (NSE y KGE) entre las modelaciones que consideraban el efecto del incendio forestal versus las que no. Debido a esto se propone como trabajo futuro implementar esta metodología en una cuenca que tenga un grado de afectación mayor al 25% del área de ésta.

Del análisis espacial realizado en la sección 5.3.5 es posible concluir que en promedio la variable más sensible por las modificaciones realizadas corresponde a la escorrentía, la cual al incluir el efecto del incendio forestal presenta un incremento en este flujo. Específicamente la mayor escorrentía corresponde a la modelación elaborada con la librería de vegetación construida por Zhao et al. (2016). Mientras que la menor escorrentía se presenta en la modelación que incluye la información de las mediciones de infiltración y la librería de vegetación modificada (Zhao et al. 2016). Estos resultados evidencian que la disminución local en la conductividad hidráulica en la zona afectada por el incendio forestal produce aparentemente un aumento en el almacenamiento del suelo. Por otra parte, el efecto generado al considerar un bosque afectado por el incendio forestal produce consistentemente en todos los experimentos un aumento en la escorrentía. La segunda variable que en promedio es mayormente afectada por las modificaciones realizadas corresponde a la evapotranspiración la cual presenta una clara disminución en todas las modelaciones que consideran el efecto del incendio en la vegetación. Particularmente la modelación que presenta mayor evaporación corresponde a la que utiliza el índice de cobertura foliar previa al incendio como forzante (LAI 2001). Este resultado demuestra que al presentar una mayor cobertura vegetal se observa un incremento en la evapotranspiración del lugar, mientras que el experimento con menor evapotranspiración corresponde a la modelación que contempla la utilización de las mediciones de conductividad hidráulica y el catastro de vegetación realizada por Zhao et al. (2016).

Si bien las demás variables (cobertura nival, SWE, humedad de los estratos) analizadas presentan cambios en las modelaciones realizadas, en promedio presentan menores tasas de variación en los experimentos numéricos desarrollados.

Es posible concluir que los indicadores hidrológicos utilizados son capaces de representar dos comportamientos en los resultados obtenidos. El primero corresponde a la invariabilidad de los coeficientes NSE y KGE en las modelaciones realizadas, dejando en evidencia que en términos de los caudales promedios de todas las modelaciones se tiene un comportamiento muy similar. Mientras que al analizar los indicadores hidrológicos expuesto en la sección 5.3.6 es posible identificar un claro incremento en el rendimiento en todas las modelaciones que consideran el efecto del incendio forestal en la vegetación del lugar en términos de la pendiente de la sección media de la curva de duración, caudales altos($Q_{5\%}$), caudales bajos($Q_{95\%}$) y coeficiente de escorrentía (RR). Esta experiencia deja en evidencia la importancia de realizar un análisis de los resultados con múltiples indicadores, con la finalidad de detectar diversos comportamientos en los experimentos desarrollados y llevar a cabo una comparación integral de los resultados.

Considerando el rendimiento de las modelaciones realizadas y las horas de trabajo destinadas para su desarrollo, se concluye que la modelación más eficiente corresponde a la que utiliza la librería de vegetación de Zhao et al (2016). Ya que en términos comparativos la modelación que utiliza la librería modificada de vegetación, la cual no considera el incendio, tiene una notoria disminución en el rendimiento con respecto a la original. Adicionalmente para la realizar este experimento no se utilizaron horas de trabajo en terreno para la toma de datos, lo cual significo un costo económico en términos de la visita a terreno. Por otra parte, la elaboración del LAI variable en el tiempo con una resolución temporal tri-horaria, significo un costo en términos de procesamiento computacional para extraer la información de los productos satelitales. La información disponible en la librería de vegetación permite la clasificación de hasta 10 clases distintas de cobertura de suelo, la cual en conjunto con un algoritmo de designación de LAI a nivel mensual para cada clase, permite una modelación eficiente en términos de horas de trabajo en comparación a los otros experimentos elaborados.

En general se concluye que el estudio realizado genera un aporte en la determinación del impacto de los incendios forestales en los procesos hidrológicos. Determinando que variables son mayormente afectadas y describir que modelación es más eficiente en términos de rendimiento y horas de trabajo implementadas. Futuras investigaciones son necesarias para identificar el efecto de los incendios forestales en áreas más extensas o con distintas características geomorfológicas. Adicionalmente, se considera de gran relevancia la implementación de esta metodología en otro modelo hidrológico que le de mayor importancia a la vegetación del lugar de estudio.

6.2 Comentarios Finales

6.2.1 Análisis Geoespacial

Mediante el análisis de severidad de quemado con el coeficiente dNBR es posible identificar la zona afectada y el grado de afectación de ambos incendios forestales. Si bien el efecto antrópico genera un grado de incerteza en el análisis debido a la deforestación propia de la actividad humana, este es compensado con la ubicación de la zona afectada por el incendio, la cual se encuentra alejada de asentamientos urbanos.

Según la información recopilada en este trabajo es posible concluir que la vegetación quemada el año 2002 en el Parque Nacional Tolhuaca corresponde a bosque nativo. La rápida recuperación del bosque en los primeros 4 años es atribuible a la aparición de matorrales y especies exóticas. La posterior estabilización está relacionada con la aparición de especies arbóreas nativas de la zona como es la Araucaria y la Lengua.

El producto satelital Modis LAI/FPAR permite estudiar la variabilidad mensual que tiene el LAI en la zona de estudio. Adicionalmente, tiene la capacidad de delimitar la zona afectada por el incendio con gran claridad. Fue posible identificar que la vegetación quemada carece de recuperación posterior al invierno, generando las mayores diferencias con una vegetación sana los meses de entre octubre a diciembre.

Según la última imagen analizada antes del incendio 2015 el bosque no se encontraba en total recuperación antes de este evento, lo cual se verifica con la variación interanual de LAI, la cual presenta un descenso significativamente menor comparado al descenso del primer evento. Esto está relacionado con el lento crecimiento de las especies arbóreas nativas, las cuales pueden tardar hasta 30 años repoblar la zona afectada.

Es importante mencionar que en este estudio se realiza una aproximación en el cálculo de la evapotranspiración mediante la fórmula de Penman Monteith la cual utiliza el LAI para la caracterización del coeficiente de cultivo y calcular la transpiración vegetal. Esta aproximación no puede ser verificada debido a la falta de mediciones de esta variable en el lugar de estudio y en consecuencia puede estar implicando errores al momento de realizar la modelación. Es por esto que se considera de gran valor analizar alguna metodología o instrumentación que pueda entregar un valor de evapotranspiración en una zona afectada por los incendios forestales, teniendo en cuenta de las particularidades de la una zona afectada por un incendio podría generar importantes modificaciones en esta variable.

6.2.2 Mediciones de infiltración

La resolución de las imágenes Landsat permitió identificar zonas de muestreo con gran precisión, permitiendo caracterizar las distintas severidades de quemado en la actividad de terreno que se realizó.

En terreno se pudo verificar el estado de recuperación del bosque posterior al incendio del año 2015, constatándose que la recuperación en sus primeras etapas está compuesta principalmente por matorrales y quila. Adicionalmente se observa la resistencia que tiene algunas especies nativas como la araucaria.

Con estas mediciones se caracterizó la conductividad hidráulica de la zona de estudio con la única precisión de que a la zona fuera del parque nacional se le otorgó un valor de conductividad hidráulica no quemada, la cual fue medida en el Parque Nacional en una de las zonas que no fueron afectadas. Esto podría generar problemas en la estimación de este parámetro para toda la cuenca, ya que se supone que las condiciones geomorfológicas son similares, lo cual es errado en la parte más baja de la cuenca donde las condiciones geomorfológicas ya no son cordilleranas sino más bien características del valle.

6.2.3 Modelación Hidrológica

En términos generales el modelo VIC entrega resultados concordantes a lo observado a escalas temporales mensuales, a escalas menores tiende a presentar un retraso importante (2-4 días) en el hidrograma y tiende a subestimar las crecidas mientras que las recesiones las sobreestima. Las diferencias observadas en la curva de variación estacional en el periodo de calibración están asociadas a un error al momento de caracterizar la nieve de ese periodo debido a que el peak observado en el mes de agosto posiblemente se deba producto a la nieve acumulada durante los meses previos. Este desfase en el derretimiento puede estar relacionado con la necesidad de calibrar parámetros de la nieve como, por ejemplo, el albedo de esta.

Al analizar la variación espacial de la evapotranspiración queda en evidencia que al considerar el efecto del incendio en la vegetación se presenta una disminución de este flujo, mientras que la escorrentía presenta un incremento. Por otra parte, las modelaciones que consideraron la distribución del parámetro K_s presentaron un incremento local de la escorrentía, producto de la disminución de la conductividad en estos pixeles y por lo tanto la disminución de la infiltración del agua a la matriz del suelo.

Considerando lo similar de los resultados de los distintos experimentos realizados, queda en evidencia que el modelo utilizado no les asigna gran importancia a los cambios de vegetación producto a un incendio forestal. Esto se debe principalmente a que el modelo solo divide en capas la vegetación presente en un pixel, pero no considera variaciones estomáticas entre especies de vegetación o subdivide la vegetación en dosel y sotobosque como es realizado por otros modelos hidrológicos.

Se considera de gran importancia generar un estudio de similares características para evaluar la sensibilidad de los parámetros que fueron calibrados, ya que con los resultados obtenidos no es posible determinar la magnitud de variación que tienen asociados las distintas configuraciones de estos.

Bibliografía

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration „ METRIC ... — Model, (August), 380–395.
- Alvarez-garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-bigiarini, M., ... Garreaud, R. (2018). The CAMELS-CL dataset : catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, 5817–5846.
- Andrzej, B., Arbaugh, M. J., Allen, R. R., & Christian, A. (2008). Introduction Wildland Fires and Air Pollution. *Developments in Environmental Science*, Volume 8, Pages 1-638.
- Bran, D. E.; Cecchi, G. A.; Gaitán, J.J.; Ayesa, J.A.; López, C. R. (2007). Efecto de la severidad de quemado sobre la regeneración de la vegetación en el Monte Austral. *Ecología Austral*, 17., Brooks,.
- Freeze, A. R., Harlan, R. L.(1969). Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrologic responde model.
- Brown, J. , K. ; Smith, J., K. (2000). Wildland Fire in Ecosystems Effects of Fire on Flora.
- CONAF. (2017). Análisis de la Afectación y Severidad de los Incendios Forestales, 56.
- Corp Soilmoisture Equipment. (2012). Instrucciones de operación, (805), 1–53.
- DeBano, L. F., DeBano, L. F., Neary, D. G., & Ffolliott, P. F. (1998). *Fire effects on ecosystems*. John Wiley & Sons.
- DGA. (1987). Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- DGA. (2004). Cuenca del río Bio Bio.
- Duan, Q., Soroosh, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Reserch*, 9(6), 686–696. <https://doi.org/10.1109/89.943346>
- Emelko, M. B., Silins, U., Bladon, K. D., & Stone, M. (2010). Implications of land disturbance on drinking water treatability in a changing climate : Demonstrating the need for “ source water supply and protection ” strategies. *Water Research*, 45(2), 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.051>
- Fennessey, B. N., Vogel, R. M., & Members, A. (1990). Regional flow - duration curves for ungauged sites in massachusetts, *116*(4), 530–549.
- Fernández, I., Olivares, L., Morales, N., Salvatierra, J., Gómez, M., & Montenegro, G. (2010). Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales, 149. Retrieved from http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1363716217res_baja.pdf

- Gajardo Michell, R. (1995). *La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica* (2a ed.). Santiago: Santiago : Universitaria.
- Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T., & Su, F. (2009). 6 Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model, (Vic), 120–173.
- González, M. E., & Veblen, T. T. (2007). Wildfire in Araucaria araucana forests and ecological considerations about salvage logging in areas recently burned. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80, 243–253. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2007000200009>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hohner, A. K., Cawley, K., Oropeza, J., Summers, R. S., & Rosario-ortiz, F. L. (2016). Drinking water treatment response following a Colorado wild fire. *Water Research*, 105, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.034>
- Hrachowitz, M., Clark, M., P. (2017). Hess Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods, (April).
- Lane, P. N. J., Sheridan, G. J., & Noske, P. J. (2006). Changes in sediment loads and discharge from small mountain catchments following wildfire in south eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 331(3–4), 495–510. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.035>
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, J. (1994). based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, 99.
- Mahat, V., Silins, U., & Anderson, A. (2016). Effects of wildfire on the catchment hydrology in southwest Alberta. *Catena*, 147, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.040>
- Malvar, M. C., Prats, S. A., Nunes, J. P., & Keizer, J. J. (2011). Post-fire overland flow generation and inter-rill erosion under simulated rainfall in two eucalypt stands in north-central Portugal \$. *Environmental Research*, 111(2), 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.09.003>
- Maurer, E. (2011). VIC Hydrology Model Training Workshop.
- Mendoza, P. A. (2019). Modelación hidrológica Motivación.
- P, H. J. H., Galleguillos, M., & Estades, C. (2016). Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014 : Descripción del Producto, (2015), 1–4.
- Poon, P. K., & Kinoshita, A. M. (2018a). Spatial and temporal evapotranspiration trends after wildfire in semi-arid landscapes. *Journal of Hydrology*, 559, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.023>

- Poon, P. K., & Kinoshita, A. M. (2018b). Spatial and temporal evapotranspiration trends after wildfire in semi-arid landscapes. *Journal of Hydrology*, 559, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.023>
- Prosser, I., & Williams, L. (1998). *Effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest*. *Hydrological Processes* (Vol. 12). [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199802\)12:2<251::AID-HYP574>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12:2<251::AID-HYP574>3.0.CO;2-4)
- Rivera Hernández, D. A. (2008). Sucesiones antropogénicas, post incendios en bosques de Lenga (*Nothofagus pumilio*), en el Parque Nacional Torres del Paine, Chile.
- Ulloa Duarte, J. P. (2012). Calibración y uso del modelo VIC para el pronóstico de caudales de deshielo en la cuenca de Aconcagua en Chacabuquito, 73.
- Urrutia de Hazbun, Rosa; Lanza Lazcano, C. (1993). Catastrofes en Chile 1541-1992.
- Vargas, X., Mc Phee, J., Rondanelli, R., Daniele, D., Vicuña, S., Meza, F., ... Kappe, J. (2017). Metodología para la Actualización del Balance Hídrico Nacional.
- Vargas, X., Mc Phee, J., Rondanelli, R., Daniele, D., Vicuña, S., Meza, F., ... Kappe, J. (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la macrozona sur y parte norte de la macrozona austral.
- Veblen, T., Burns, B., Kitzberger, T., Lara, A., & Villalba, R. (1995). The ecology of the conifers of southern South America (pp. 120–155).
- Veblen, T. T. (1982). Regeneration patterns in *Araucaria araucana* forests in Chile. *Journal of Biogeography*, 11–28.
- Veblen, T. T., Kitzberger, T., Villalba, R., & Donnegan, J. (1999). Fire History in Northern Patagonia: The Roles of Humans and Climatic Variation. *Ecological Monographs*, 69(1), 47–67. <https://doi.org/10.2307/2657194>
- Wagtendonk, J. A. N. W. V. A. N., Sugihara, N. G., & Stephens, S. L. (2006). Fire in California 's Ecosystems, (June), 6662.
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., ... Gong, P. (2016). Remote Sensing of Environment Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

Anexo A

Permeámetro de Guelph

Descripción del instrumento

“El permeámetro Guelph es un instrumento de fácil manejo que permite medir in-situ la conductividad hidráulica de una manera rápida y precisa. Permite obtener una evaluación exacta en todo tipo de suelo de la conductividad hidráulica y capacidad de absorción del suelo, y la matriz de potencial del flujo. El equipo puede ser transportado, armado y operado fácilmente por una sola persona. Las mediciones pueden hacerse entre ½ hora a 2 horas dependiendo del tipo de suelo y solamente requiere de 2.5 litros de agua aproximadamente. Las mediciones pueden hacerse en un rango de entre 15 a 75 cm por debajo de la superficie del suelo. El permeámetro Guelph es un kit completo que consiste en el permeámetro, un trípode de campo, un barreno de pozo, herramientas para la limpieza y preparación de la perforación, contenedor de agua plegable y bomba de mano para prueba de vacío, todo en un durable estuche de transporte. También hay accesorios adicionales disponibles para extender la capacidad de medición del permeámetro. Los accesorios de profundidad aumentan la operación de profundidad en 80 cm. La profundidad máxima de funcionamiento es de 315 cm. Los accesorios de anillo permiten mediciones de infiltrómetros de anillo con anillos de 10 y 20 cm de diámetro. Un adaptador de presión permite realizar mediciones bajo condiciones tensionales y de muy baja tensión (cabeza negativa).”(Corp Soilmoisture Equipment, 2012) A continuación en la Figura 0-1 se presenta el instrumento en la zona de estudio.

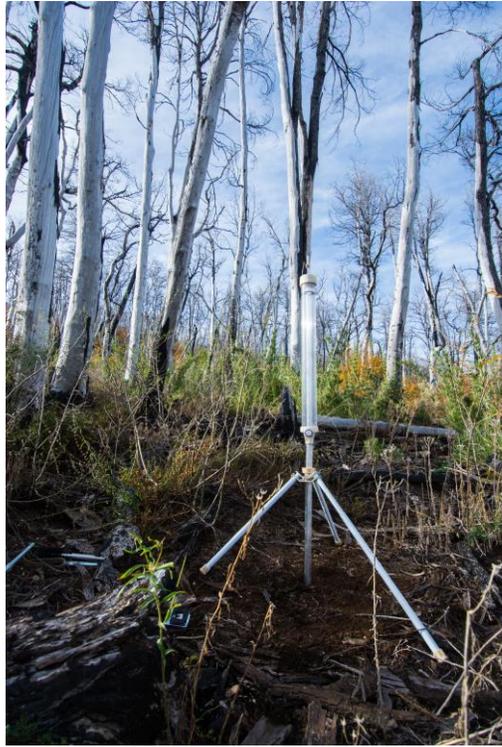


Figura 0-1 Permeámetro de Guelph

Teoría de Operación

El instrumento es un permeámetro que trabaja en el hoyo con una carga hidráulica constante, utilizando el principio de Mariott. Se establece y mantiene un nivel constante determinado por la posición del fondo del Tubo de Aire (Figura 0-2). “Conforme el nivel de agua en el depósito cae, se crea un vacío en el espacio de aire que está por encima del agua. El vacío solo puede liberarse cuando el aire de la presión atmosférica del ambiente, el cual entra por la parte superior del Tubo de Aire, sale burbujeando de la Punta Interna de Aire, burbujas de aire emergen de la punta y se elevan hacia el espacio de aire del depósito. Entonces el vacío se libera parcialmente y el agua del depósito repone el agua dentro del pozo. La geometría y el tamaño de la apertura de la Punta de Aire Interna están diseñados para controlar el tamaño de las burbujas con el fin de prevenir fluctuaciones en el nivel de agua del pozo.”(Corp Soilmoisture Equipment, 2012)

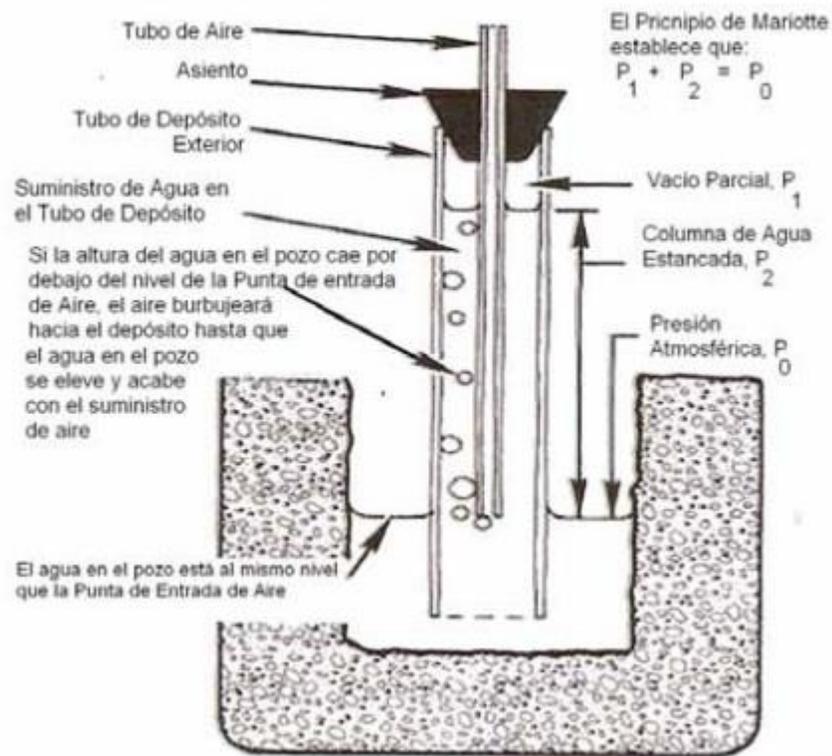


Figura 0-2 Diagrama de funcionamiento permeámetro de Guelph(Corp Soilmoisture Equipment, 2012)

“Una vez establecida la forma única del “bulbo” o zona de saturación (Figura 0-3), el flujo de salida de agua del pozo alcanza una tasa de flujo estable, la cual puede ser medida. La tasa de este constante flujo de agua, junto con el diámetro del pozo y la altura del agua en el pozo se pueden usar para determinar exactamente la conductividad del campo saturado, el potencial de flujo mátrico, parámetro a^* y la capacidad de absorción del suelo.”(Corp Soilmoisture Equipment, 2012)

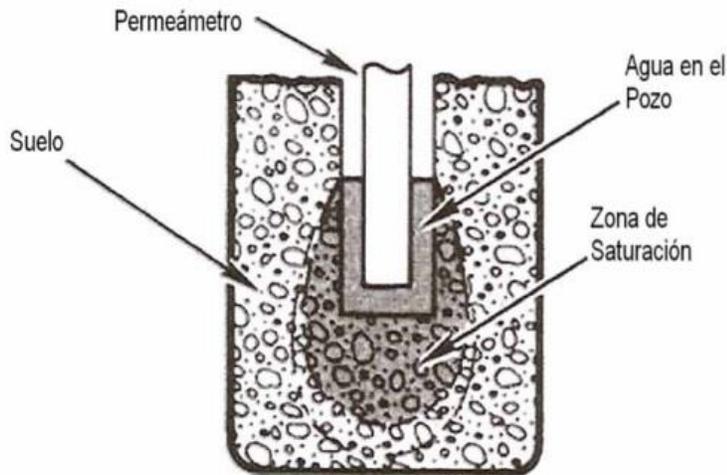


Figura 0-3 Efecto del permeámetro en la tierra y forma del bulbo de saturación (Corp Soilmoisture Equipment, 2012)

Metodología de medición

Una vez determinado el punto donde se va a llevar a cabo la prueba, primero se marca el sitio utilizando un GPS y se realizan observaciones características del lugar como distancia al río, condiciones de suelo y vegetación, entre otras. Posteriormente con el barreno se procedió a realizar la perforación del suelo. Alcanzada la profundidad deseada, se extrajo el barreno para examinar el tipo de suelo presente. Con el cepillo se logra un mejor acabado de la perforación ratificando la forma cilíndrica de la perforación. Una vez lista la perforación, se mide el diámetro y profundidad mediante una huincha metálica.

Con la perforación lista y el permeámetro armado, se procede a instalar el equipo. Inicialmente se dispone el trípode balanceado sobre la perforación para luego instalar el instrumento, insertándolo en el trípode y luego en la perforación realizada.

El equipo es llenado con agua cuando se encuentra nivelado y en posición vertical, es importante en esta etapa chequear que la válvula del instrumento se encuentre cerrada ya que invalida la prueba en caso contrario y es necesario realizar la perforación en otro punto. Con el instrumento cargado con agua se procede a abrir la válvula. En primera instancia se espera que el sistema se estabilice, es decir que la perforación se llene de agua hasta llegar al fondo del Tubo de Aire. Ya estabilizado se le da inicio al cronómetro y se registra la altura de agua inicial. Luego se comienzan a realizar mediciones cada 15 segundos, hasta que la columna de agua es completamente infiltrada. Adicionalmente se mide la altura del espejo de agua hasta la superficie, utilizando la huincha metálica.

Terminada la toma de datos se procede a limpiar el equipo con el agua excedente de la prueba, particularmente la sección que se encuentra al interior de la perforación. Con la finalidad de evitar que esta sección se tape con barro y genere un error sistemático en las otras mediciones. Finalmente

se procede a desarmar el equipo y guardarlo en su caja para ser transportado al siguiente punto de medición.

Con mediciones se calcula la velocidad media de descenso y posibilita el cálculo del caudal exterior mediante la fórmula (7). El parámetro de área interior lo proporciona el fabricante y es de 2.15 cm².

$$Q = V_{media} * A_{interior} \quad (7)$$

Donde:

Q: Caudal exterior [cm³/min]

V_{media} : Velocidad media de descenso [cm/min]

$A_{interior}$: Área interior del instrumento [cm²]

Luego se determina el valor de alfa que caracteriza el medio poroso donde se llevó a cabo la prueba, según la Tabla 0-1.

Tabla 0-1 Clasificación del medio poroso

Categoría del Medio Poroso	α^* [1/m]
Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados	1
Suelos que tienen estructura fina y desestructurada	4
Suelos estructurados, desde arcilla pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas	12
Arenas gruesas y grava. Se incluye algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos	36

La forma del bulbo en el suelo es representada por el factor C. Este coeficiente se obtiene utilizando la fórmula (8) (Corp Soilmoisture Equipment, 2012).

$$C = 4 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{H}{2 \cdot a} \right) - \sqrt{\left(\frac{a}{H} \right)^2 + \frac{1}{4} + \frac{a}{H}} \right] \quad (8)$$

Donde:

C= factor de forma [-]

H= carga hidráulica [cm]

a= radio de la perforación [cm]

Se evaluaron tres igualdades para el cálculo de la conductividad hidráulica. Estas son la ecuación de Glover, Laplace y Reynolds-Elrick. Las cuales se exponen en las formulas (9), (10) y (7).

$$K_{fsG} = \frac{Q \cdot C}{2 \cdot \pi \cdot H^2} \text{ (5) (Glover) (9)}$$

$$K_{fsL} = \frac{Q \cdot C}{2 \cdot \pi \cdot H^2 + \pi \cdot a^2 \cdot C} \text{ (6) (Laplace) (10)}$$

$$K_{fs(RyE)} = \frac{Q \cdot C}{2 \cdot \pi \cdot H^2 + \pi \cdot a^2 \cdot C + 2 \cdot \pi \cdot \frac{H}{\alpha^*}} \text{ (7) (Reynolds-Elrick) (11)}$$

Donde:

Q: Caudal exterior [cm³/min]

C= factor de forma [-]

H= carga hidráulica [cm]

a= radio de la perforación [cm]

α^* = categoría medio poroso [1/m]

K_{fs} = Conductividad hidráulica saturada de campo [cm/min]

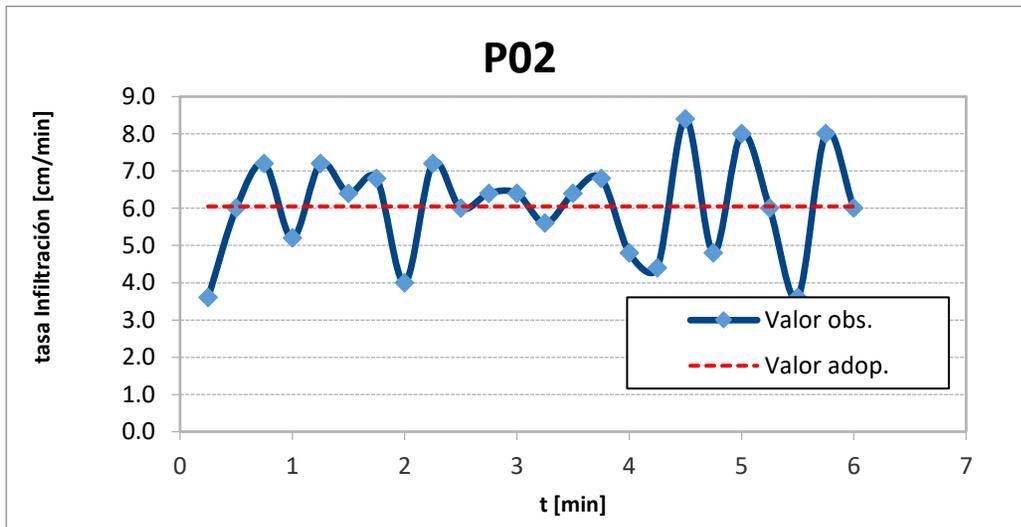
Anexo B

En el siguiente anexo se adjuntan las tablas y gráficos de las mediciones de infiltración realizadas en terreno.

	P02	P03	P04	P05	P06	P16	P07	P08	P09	P10
Diámetro [m]	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Profundidad [m]	0,195	0,278	0,165	0,183	0,183	0,183	0,18	0,16	0,185	0,16
Altura carga [m]	0,1	0,075	0,08	0,103	0,088	0,128	0,095	0,1	0,09	0,053
a [cm]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Ainterior [cm²]	2,16	2,16	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Alfa (a*) [1/cm]	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
H [cm]	10	7,5	8	10,3	8,8	12,8	9,5	10	9	5,3
C	0,691	1,279	1,136	0,638	0,936	0,280	0,787	0,691	0,891	2,190
Tasa [cm/min]	4,980	6,050	7,312	4,092	4,832	5,152	5,459	7,364	9,247	2,463
Qexterior [cm³/min]	10,758	13,068	15,721	8,798	10,388	11,076	11,736	15,832	19,881	5,296

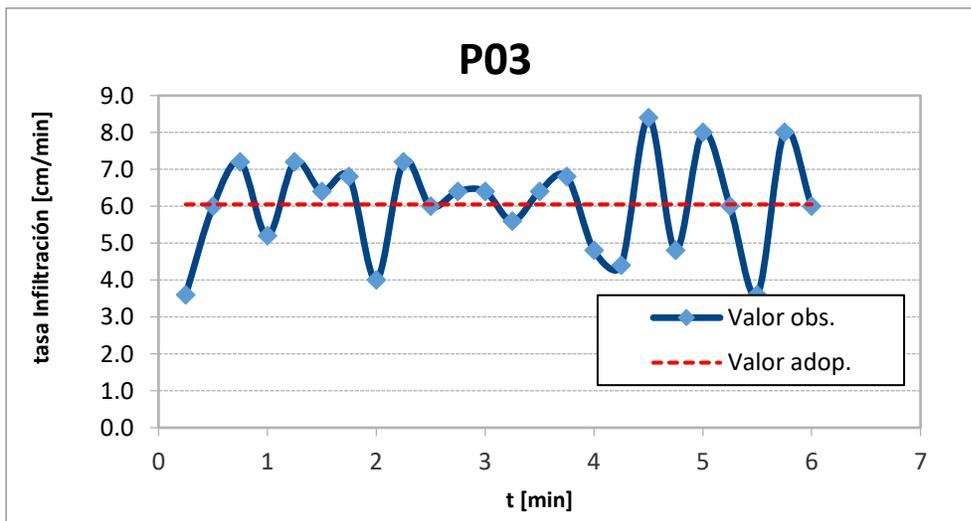
P02			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0,0	31,1	
30	0,5	33	3,8
40	0,7	34,5	9
50	0,8	35,1	3,6
60	1,0	36	5,4
70	1,2	36,9	5,4
80	1,3	37,5	3,6
90	1,5	38,6	6,6
100	1,7	39,4	4,8
110	1,8	40,3	5,4
120	2,0	41,1	4,8
130	2,2	42	5,4
140	2,3	42,4	2,4
150	2,5	43,5	6,6
160	2,7	44,5	6
170	2,8	45,3	4,8
180	3,0	46	4,2
190	3,2	46,5	3
200	3,3	47,6	6,6
210	3,5	48,7	6,6
220	3,7	49,5	4,8
230	3,8	50	3
240	4,0	51,2	7,2
250	4,2	51,9	4,2
260	4,3	52,9	6
270	4,5	53,7	4,8

280	4,7	54,4	4,2
290	4,8	55,1	4,2
300	5,0	55,7	3,6
310	5,2	56,5	4,8
320	5,3	57,3	4,8
330	5,5	58	4,2
340	5,7	59	6
350	5,8	59,5	3
360	6,0	60,5	6
370	6,2	61,3	4,8
380	6,3	62,2	5,4
390	6,5	63	4,8
400	6,7	64,1	6,6
410	6,8	65	5,4
420	7,0	65,9	5,4
430	7,2	66,8	5,4
440	7,3	67,5	4,2
450	7,5	68,5	6
460	7,7	69,3	4,8
470	7,8	70,2	5,4
480	8,0	71	4,8
490	8,2	71,5	3
500	8,3	72,2	4,2
510	8,5	73,5	7,8
520	8,7	74,2	4,2
530	8,8	74,7	3

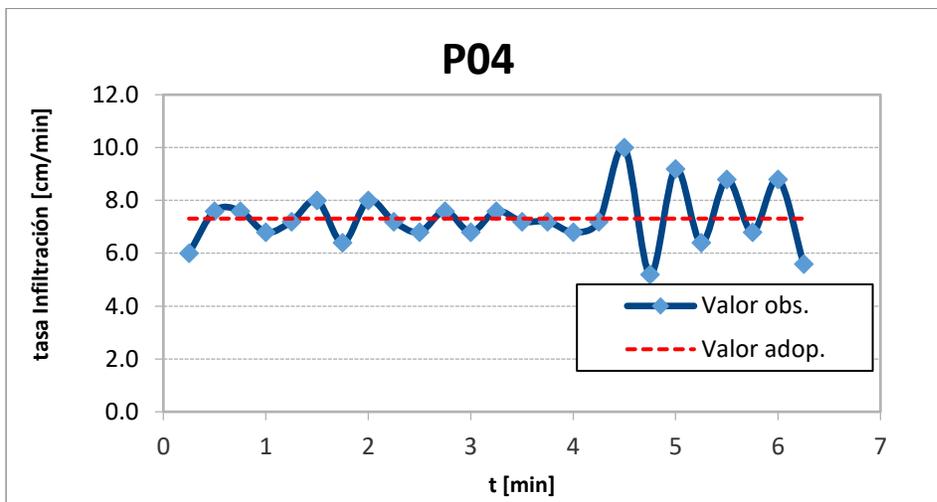


P03			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0	39,2	

15	0,25	40,1	3,6
30	0,5	41,6	6,0
45	0,75	43,4	7,2
60	1	44,7	5,2
75	1,25	46,5	7,2
90	1,5	48,1	6,4
105	1,75	49,8	6,8
120	2	50,8	4,0
135	2,25	52,6	7,2
150	2,5	54,1	6,0
165	2,75	55,7	6,4
180	3	57,3	6,4
195	3,25	58,7	5,6
210	3,5	60,3	6,4
225	3,75	62	6,8
240	4	63,2	4,8
255	4,25	64,3	4,4
270	4,5	66,4	8,4
285	4,75	67,6	4,8
300	5	69,6	8,0
315	5,25	71,1	6,0
330	5,5	72	3,6
345	5,75	74	8,0
360	6	75,5	6,0



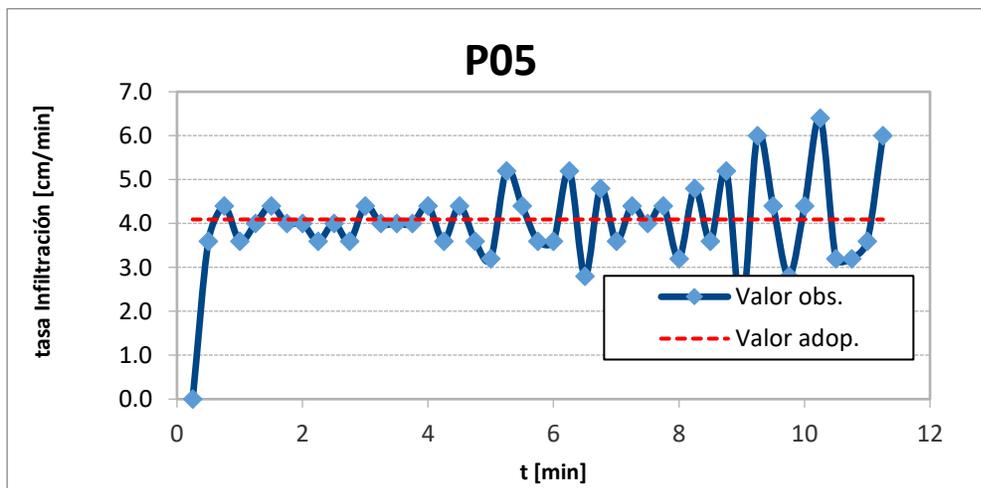
P04			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0	29,2	
15	0,25	30,7	6,0
30	0,5	32,6	7,6
45	0,75	34,5	7,6
60	1	36,2	6,8
75	1,25	38	7,2
90	1,5	40	8,0
105	1,75	41,6	6,4
120	2	43,6	8,0
135	2,25	45,4	7,2
150	2,5	47,1	6,8
165	2,75	49	7,6
180	3	50,7	6,8
195	3,25	52,6	7,6
210	3,5	54,4	7,2
225	3,75	56,2	7,2
240	4	57,9	6,8
255	4,25	59,7	7,2
270	4,5	62,2	10,0
285	4,75	63,5	5,2
300	5	65,8	9,2
315	5,25	67,4	6,4
330	5,5	69,6	8,8
345	5,75	71,3	6,8
360	6	73,5	8,8
375	6,25	74,9	5,6



P05

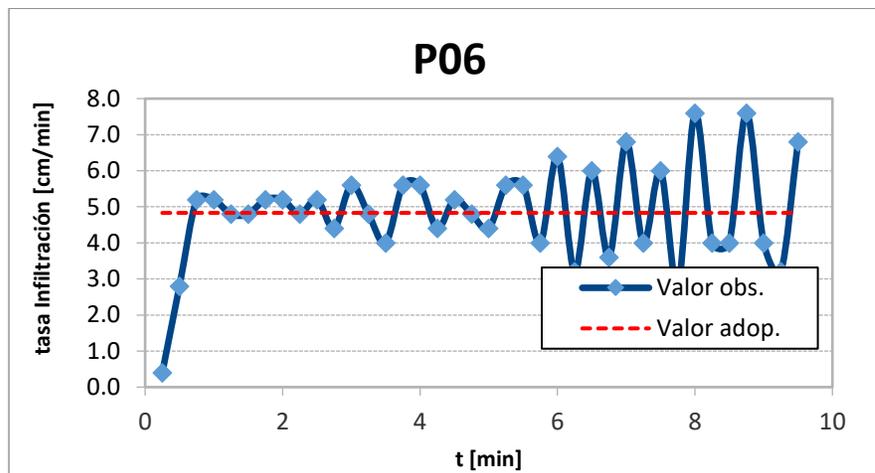
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0	30,1	
15	0,25	30,1	0,0
30	0,5	31	3,6
45	0,75	32,1	4,4
60	1	33	3,6
75	1,25	34	4,0
90	1,5	35,1	4,4
105	1,75	36,1	4,0
120	2	37,1	4,0
135	2,25	38	3,6
150	2,5	39	4,0
165	2,75	39,9	3,6
180	3	41	4,4
195	3,25	42	4,0
210	3,5	43	4,0
225	3,75	44	4,0
240	4	45,1	4,4
255	4,25	46	3,6
270	4,5	47,1	4,4
285	4,75	48	3,6
300	5	48,8	3,2
315	5,25	50,1	5,2
330	5,5	51,2	4,4
345	5,75	52,1	3,6
360	6	53	3,6
375	6,25	54,3	5,2

390	6,5	55	2,8
405	6,75	56,2	4,8
420	7	57,1	3,6
435	7,25	58,2	4,4
450	7,5	59,2	4,0
465	7,75	60,3	4,4
480	8	61,1	3,2
495	8,25	62,3	4,8
510	8,5	63,2	3,6
525	8,75	64,5	5,2
540	9	65	2,0
555	9,25	66,5	6,0
570	9,5	67,6	4,4
585	9,75	68,3	2,8
600	10	69,4	4,4
615	10,25	71	6,4
630	10,5	71,8	3,2
645	10,75	72,6	3,2
660	11	73,5	3,6
675	11,25	75	6,0



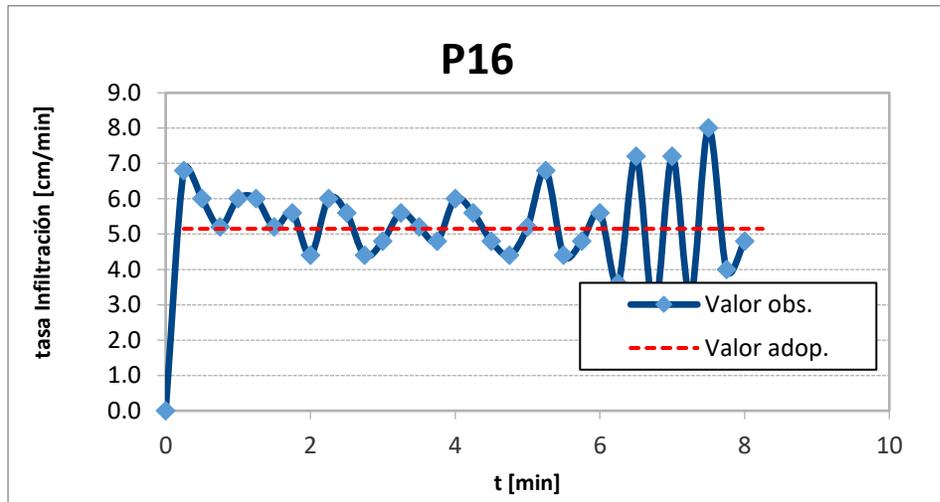
P06			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0	29,6	
15	0,25	29,7	0,4
30	0,5	30,4	2,8

45	0,75	31,7	5,2
60	1	33	5,2
75	1,25	34,2	4,8
90	1,5	35,4	4,8
105	1,75	36,7	5,2
120	2	38	5,2
135	2,25	39,2	4,8
150	2,5	40,5	5,2
165	2,75	41,6	4,4
180	3	43	5,6
195	3,25	44,2	4,8
210	3,5	45,2	4,0
225	3,75	46,6	5,6
240	4	48	5,6
255	4,25	49,1	4,4
270	4,5	50,4	5,2
285	4,75	51,6	4,8
300	5	52,7	4,4
315	5,25	54,1	5,6
330	5,5	55,5	5,6
345	5,75	56,5	4,0
360	6	58,1	6,4
375	6,25	58,9	3,2
390	6,5	60,4	6,0
405	6,75	61,3	3,6
420	7	63	6,8
435	7,25	64	4,0
450	7,5	65,5	6,0
465	7,75	66,2	2,8
480	8	68,1	7,6
495	8,25	69,1	4,0
510	8,5	70,1	4,0
525	8,75	72	7,6
540	9	73	4,0
555	9,25	73,8	3,2
570	9,5	75,5	6,8



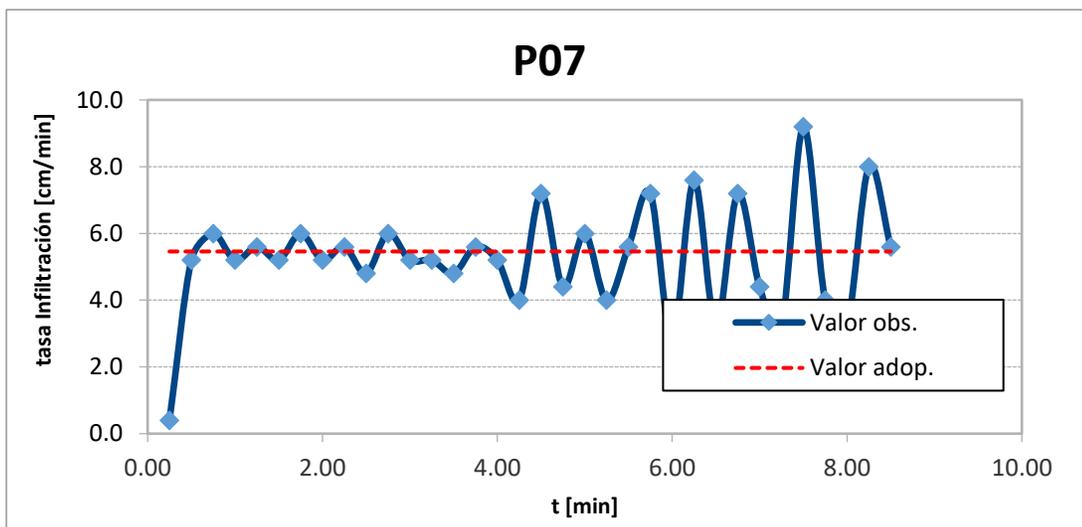
P16			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0	33,2	
15	0,25	33,2	0,0
30	0,5	34,9	6,8
45	0,75	36,4	6,0
60	1	37,7	5,2
75	1,25	39,2	6,0
90	1,5	40,7	6,0
105	1,75	42	5,2
120	2	43,4	5,6
135	2,25	44,5	4,4
150	2,5	46	6,0
165	2,75	47,4	5,6
180	3	48,5	4,4
195	3,25	49,7	4,8
210	3,5	51,1	5,6
225	3,75	52,4	5,2
240	4	53,6	4,8
255	4,25	55,1	6,0
270	4,5	56,5	5,6
285	4,75	57,7	4,8
300	5	58,8	4,4
315	5,25	60,1	5,2
330	5,5	61,8	6,8
345	5,75	62,9	4,4
360	6	64,1	4,8
375	6,25	65,5	5,6
390	6,5	66,4	3,6

405	6,75	68,2	7,2
420	7	68,9	2,8
435	7,25	70,7	7,2
450	7,5	71,5	3,2
465	7,75	73,5	8,0
480	8	74,5	4,0
495	8,25	75,7	4,8



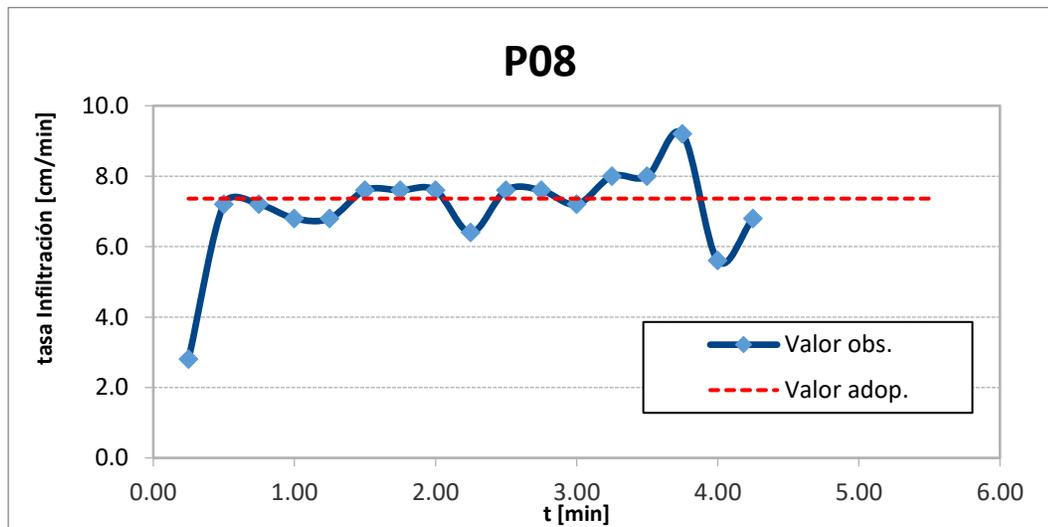
P07			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0,00	30,9	
15	0,25	31	0,4
30	0,50	32,3	5,2
45	0,75	33,8	6,0
60	1,00	35,1	5,2
75	1,25	36,5	5,6
90	1,50	37,8	5,2
105	1,75	39,3	6,0
120	2,00	40,6	5,2
135	2,25	42	5,6
150	2,50	43,2	4,8
165	2,75	44,7	6,0
180	3,00	46	5,2
195	3,25	47,3	5,2
210	3,50	48,5	4,8
225	3,75	49,9	5,6
240	4,00	51,2	5,2
255	4,25	52,2	4,0

270	4,50	54	7,2
285	4,75	55,1	4,4
300	5,00	56,6	6,0
315	5,25	57,6	4,0
330	5,50	59,00	5,6
345	5,75	60,80	7,2
360	6,00	61,5	2,8
375	6,25	63,4	7,6
390	6,50	64,2	3,2
405	6,75	66	7,2
420	7,00	67,1	4,4
435	7,25	67,9	3,2
450	7,50	70,2	9,2
465	7,75	71,2	4,0
480	8,00	72	3,2
495	8,25	74	8,0
510	8,50	75,4	5,6



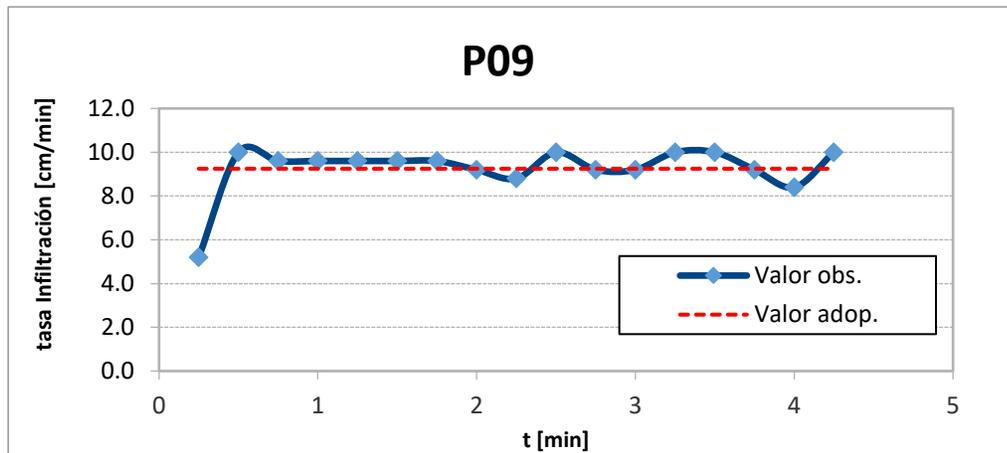
P08			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0,00	30,5	
15	0,25	31,2	2,8
30	0,50	33	7,2
45	0,75	34,8	7,2
60	1,00	36,5	6,8
75	1,25	38,2	6,8
90	1,50	40,1	7,6
105	1,75	42	7,6

120	2,00	43,9	7,6
135	2,25	45,5	6,4
150	2,50	47,4	7,6
165	2,75	49,3	7,6
180	3,00	51,1	7,2
195	3,25	53,1	8,0
210	3,50	55,1	8,0
225	3,75	57,4	9,2
240	4,00	58,8	5,6
255	4,25	60,5	6,8
270	4,50	63,1	10,4
285	4,75	64,2	4,4
300	5,00	67	11,2
315	5,25	68,5	6,0
330	5,50	71	10,0



P09			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0	35,2	
15	0,25	36,5	5,2
30	0,5	39	10,0
45	0,75	41,4	9,6
60	1	43,8	9,6
75	1,25	46,2	9,6
90	1,5	48,6	9,6
105	1,75	51	9,6
120	2	53,3	9,2
135	2,25	55,5	8,8

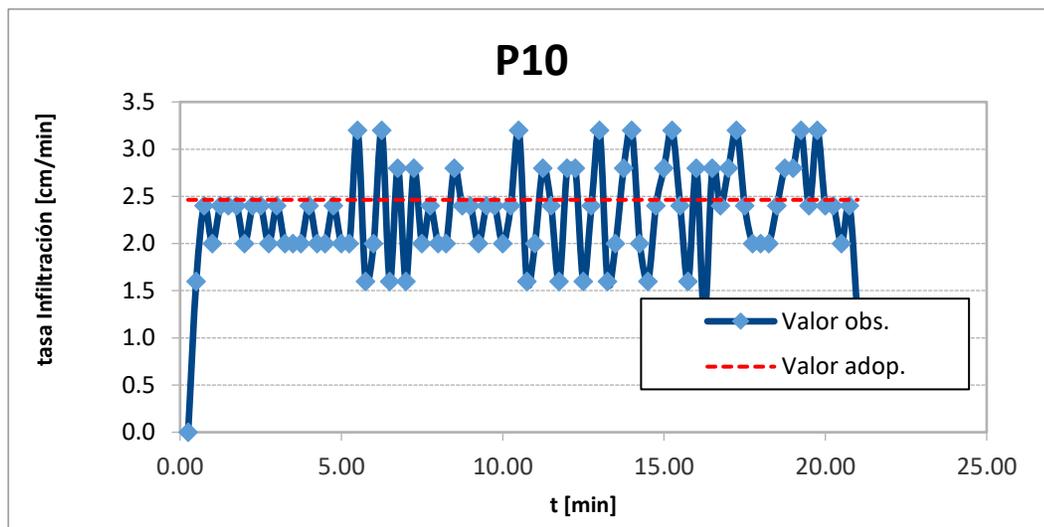
150	2,5	58	10,0
165	2,75	60,3	9,2
180	3	62,6	9,2
195	3,25	65,1	10,0
210	3,5	67,6	10,0
225	3,75	69,9	9,2
240	4	72	8,4
255	4,25	74,5	10,0

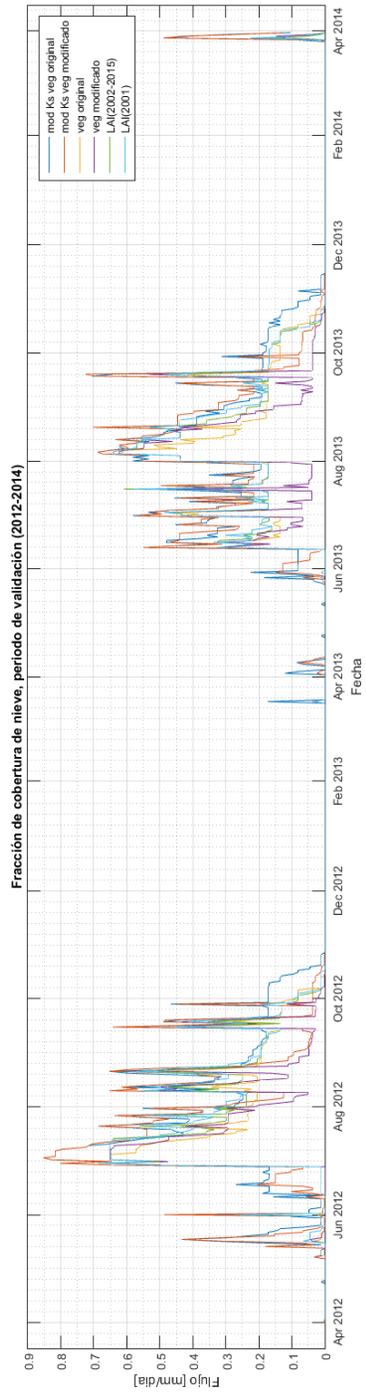
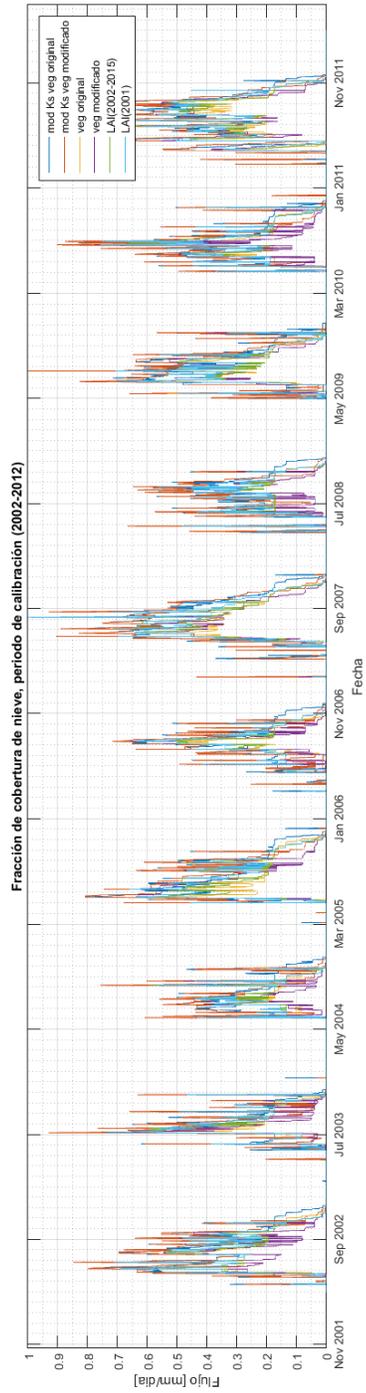


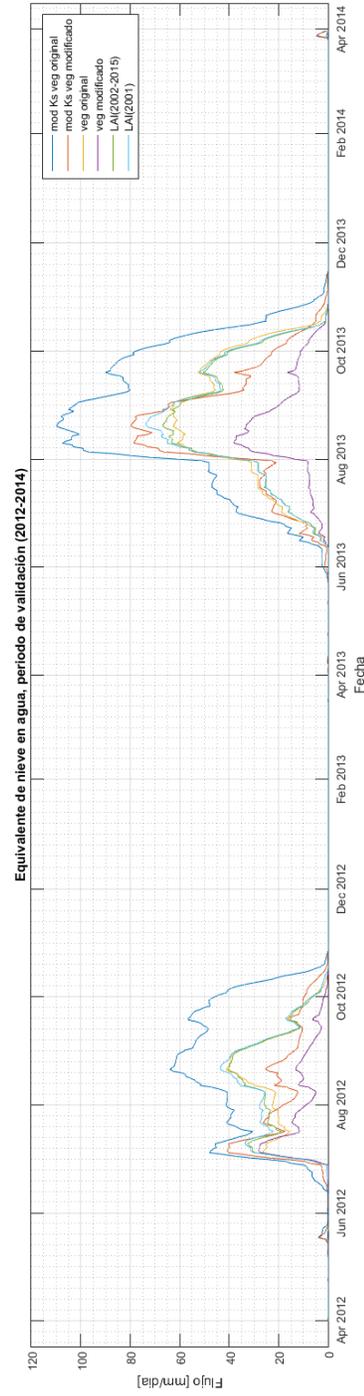
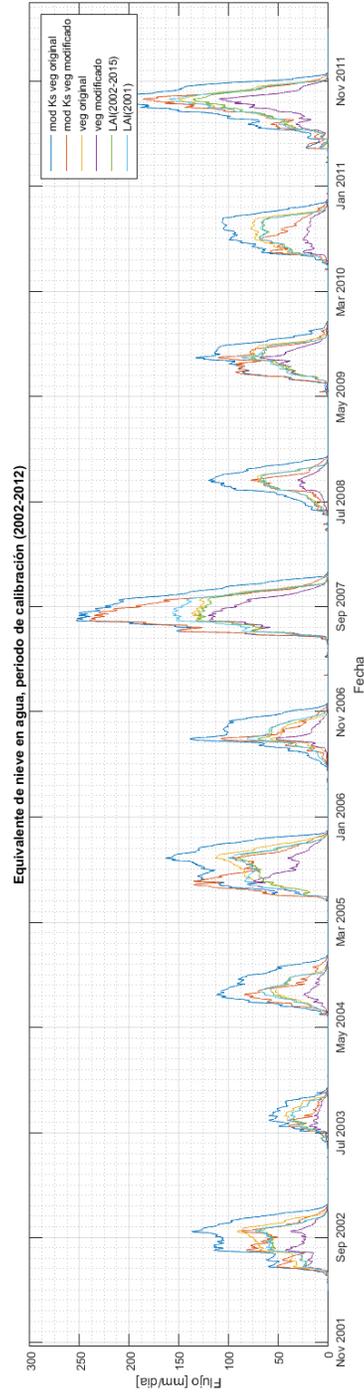
P10			
t [seg]	t [min]	h [cm]	Tasa [cm/min]
0	0,00	27	
15	0,25	27	0,0
30	0,50	27,4	1,6
45	0,75	28	2,4
60	1,00	28,5	2,0
75	1,25	29,1	2,4
90	1,50	29,7	2,4
105	1,75	30,3	2,4
120	2,00	30,8	2,0
135	2,25	31,4	2,4
150	2,50	32	2,4
165	2,75	32,5	2,0
180	3,00	33,1	2,4
195	3,25	33,6	2,0
210	3,50	34,1	2,0
225	3,75	34,6	2,0
240	4,00	35,2	2,4
255	4,25	35,7	2,0
270	4,50	36,2	2,0

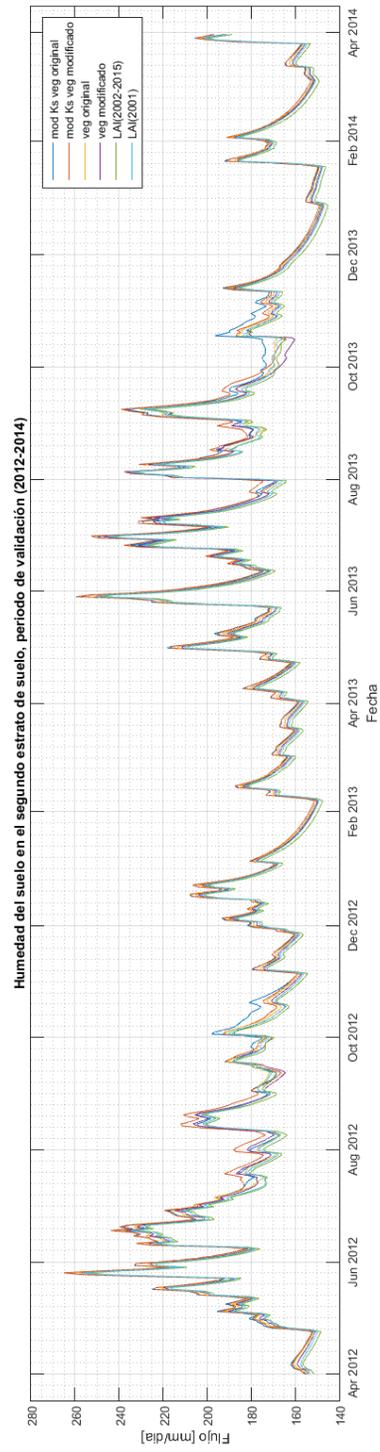
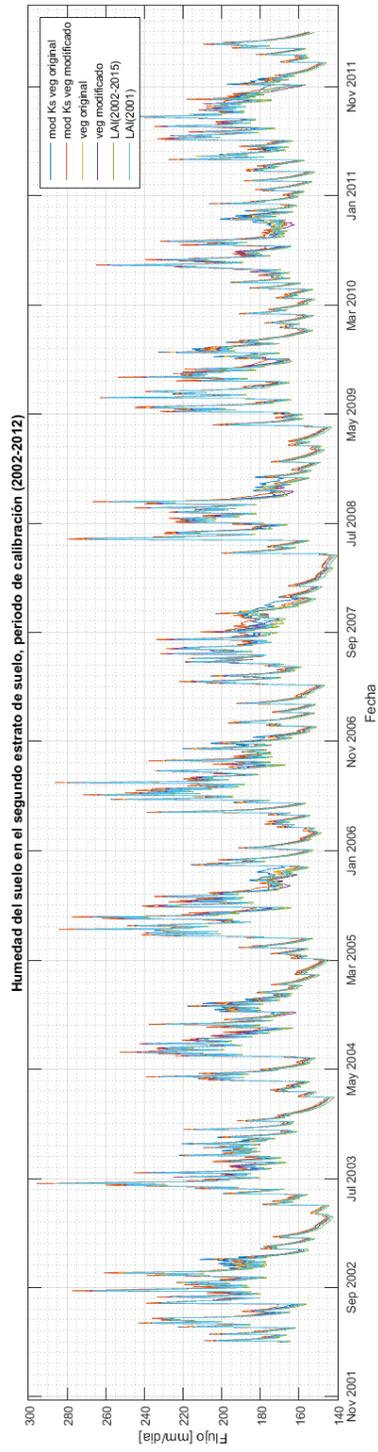
285	4,75	36,8	2,4
300	5,00	37,3	2,0
315	5,25	37,8	2,0
330	5,50	38,6	3,2
345	5,75	39	1,6
360	6,00	39,5	2,0
375	6,25	40,3	3,2
390	6,50	40,7	1,6
405	6,75	41,4	2,8
420	7,00	41,8	1,6
435	7,25	42,5	2,8
450	7,50	43	2,0
465	7,75	43,6	2,4
480	8,00	44,1	2,0
495	8,25	44,6	2,0
510	8,50	45,3	2,8
525	8,75	45,9	2,4
540	9,00	46,5	2,4
555	9,25	47	2,0
570	9,50	47,6	2,4
585	9,75	48,2	2,4
600	10,00	48,7	2,0
615	10,25	49,3	2,4
630	10,50	50,1	3,2
645	10,75	50,5	1,6
660	11,00	51	2,0
675	11,25	51,7	2,8
690	11,50	52,3	2,4
705	11,75	52,7	1,6
720	12,00	53,4	2,8
735	12,25	54,1	2,8
750	12,50	54,5	1,6
765	12,75	55,1	2,4
780	13,00	55,9	3,2
795	13,25	56,3	1,6
810	13,50	56,8	2,0
825	13,75	57,5	2,8
840	14,00	58,3	3,2
855	14,25	58,8	2,0
870	14,50	59,2	1,6
885	14,75	59,8	2,4
900	15,00	60,5	2,8
915	15,25	61,3	3,2
930	15,50	61,9	2,4

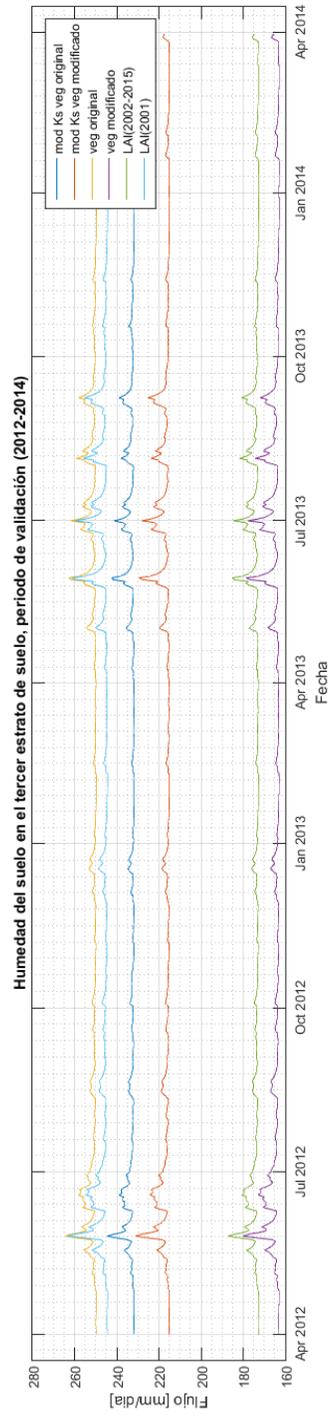
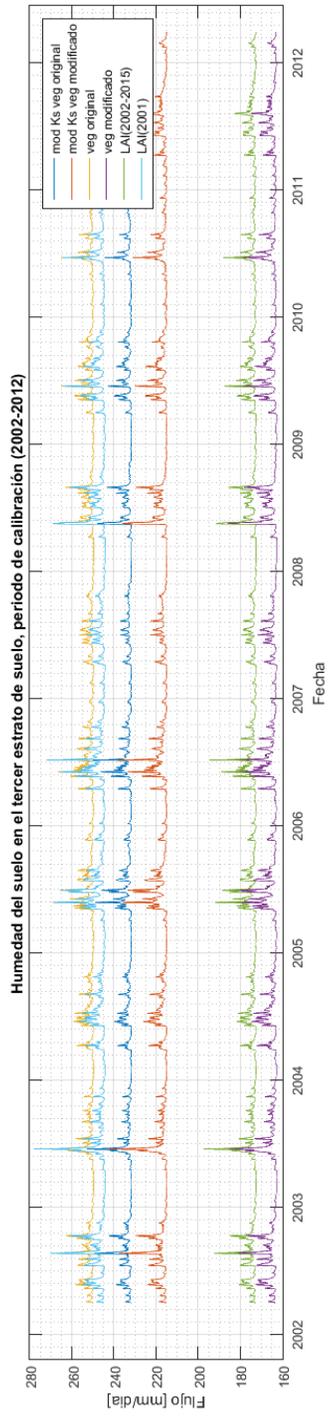
945	15,75	62,3	1,6
960	16,00	63	2,8
975	16,25	63,3	1,2
990	16,50	64	2,8
1005	16,75	64,6	2,4
1020	17,00	65,3	2,8
1035	17,25	66,1	3,2
1050	17,50	66,7	2,4
1065	17,75	67,2	2,0
1080	18,00	67,7	2,0
1095	18,25	68,2	2,0
1110	18,50	68,8	2,4
1125	18,75	69,5	2,8
1140	19,00	70,2	2,8
1155	19,25	71	3,2
1170	19,50	71,6	2,4
1185	19,75	72,4	3,2
1200	20,00	73	2,4
1215	20,25	73,6	2,4
1230	20,50	74,1	2,0
1245	20,75	74,7	2,4
1260	21,00	75	1,2







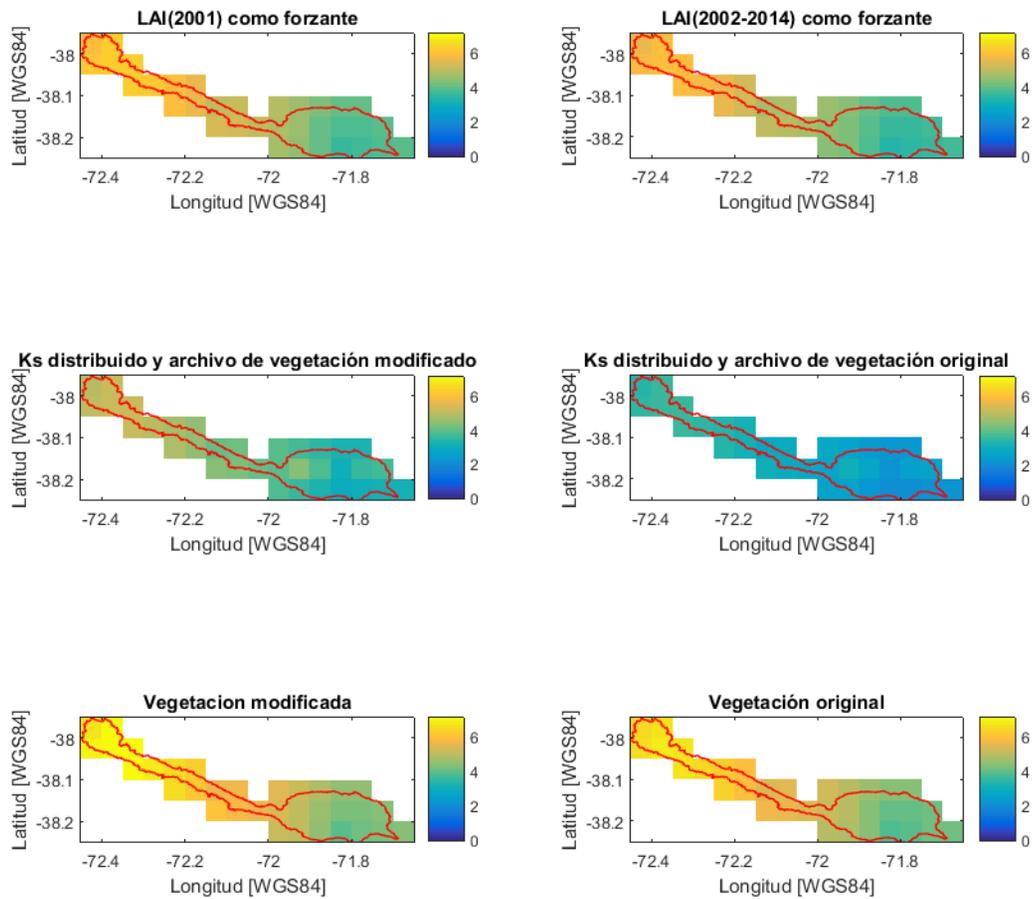




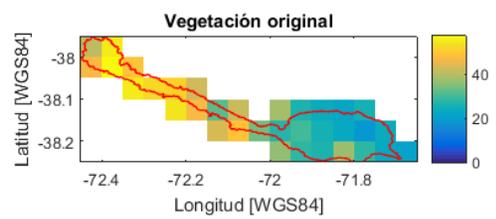
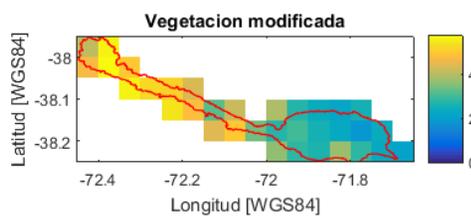
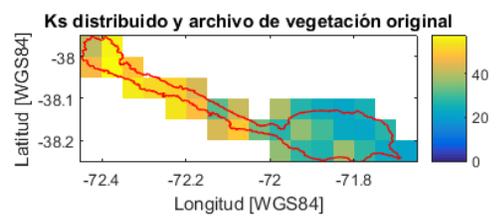
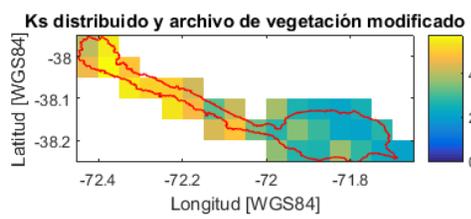
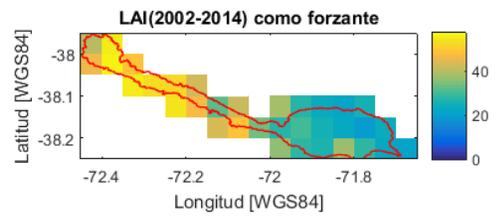
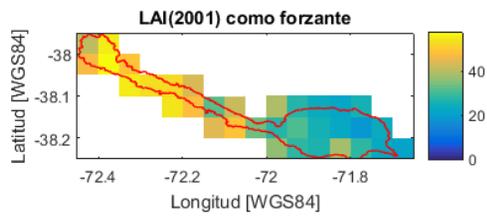
Anexo D

A continuación, se presenta la variación espacial de humedad de los tres estratos contemplados en las modelaciones. Al igual que los gráficos presentados en la sección 5.3.5, estos se encuentran normalizados por la precipitación de cada pixel.

Estrato N°1



Estrato N°2



Estrato N°3

