



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía - Programa de Magíster en Análisis Geográfico

Efectos de los cambios de uso/cobertura del suelo en crecidas del estero Nonguén: Mediante calibración del modelo hidrológico HEC-HMS

Trabajo final para optar al grado de Magíster en Análisis Geográfico



Claudio Ignacio Vega Alay
CONCEPCIÓN-CHILE
2021

Profesor Guía: Octavio Rojas Vilches
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Universidad de Concepción

Concepción, 12 de marzo del 2021

Índice

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivo específico	3
3. MARCO REFERENCIA	4
3.1. Escorrentía superficial y el ciclo de escurrimiento.....	4
3.2.1. Cambio de la cobertura de suelo y su impacto en las crecidas	7
3.3. Modelación hidrológica	8
3.3.1. Modelación hidrológica HEC-HMS.....	12
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
4.1. Área de estudio	13
4.2. Metodología	15
4.2.1. Preprocesamiento y clasificación de imágenes satelitales para la detección de cambio de uso de suelo.	16
4.2.2. Modelo hidrológico HEC-HMS.....	17
4.2.3. Calibración del modelo HEC-HMS.....	19
5. Resultados	23
5.1. Análisis de detección de cambio de cobertura de suelo	23
6. Discusión.....	38
6.1. Beneficios de la plataforma <i>Google Earth Engine</i> para la clasificación de imágenes satelitales.	38
7. Conclusiones	43
8. Bibliografía	44

Índice de tabla

Tabla 1. Tipos de escurrimiento	4
Tabla 2. Diferencia entre cobertura de suelo (Land cover) y uso de suelo (Land use). ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3. Tipos de modelos para estimar variaciones de caudal.	11
Tabla 4. Fuente de datos y descripciones	16
Tabla 5. Clases de cobertura de suelo.....	17
Tabla 6. Recopilación bibliográfica de valores HSG para las clases de uso de suelo	19
Tabla 7. Niveles de peligrosidad de las variables naturales	20
Tabla 8. Amenaza según elementos antrópicos.....	21
Tabla 9. Valores de los errores relativos y de la eficiencia NSE, obtenidos en la estimación de Q_{max} Tp y en el volumen de esorrentía.....	30
Tabla 10. Resultados de calibración de los eventos de crecida	32

Índice de Figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico y escurrimiento.....	4
Figura 2. Distribución de la precipitación en relación con las formas de escurrimiento.....	5
Figura 3. Factores detonantes y condicionantes en la generación de crecidas fluviales	6
Figura 4. Desarrollo de una crecida pre y post urbanización	8
Figura 5. La cuenca de drenaje como sistema hidrológico.....	9
Figura 6. Carta de ubicación cuenca estero Nonguén	14
Figura 7. Climograma cuenca estero Nonguén	14
Figura 8. Esquema metodológico general	15
Figura 9. Coberturas de suelo de la cuenca del estero Nonguén A) 1987, B) 1998, C) 2011 y C) 2017	23
Figura 10. Sector estadio Ester Roa Rebolledo y Universidad del Biobío afectados por inundación del año 2006	24
Figura 11. Flora y fauna de Parque Nacional Nonguén	25
Figura 12. Población Villa Nonguén y barrio privado Nonken construidas en zonas de anegamiento y cercanas a plantaciones de Eucalyptus.....	26
Figura 13. Gráfico de pérdidas y ganancias por cobertura A)1987-1998 B) 1998-2011 C) 2011-2017 .	27
Figura 14. Gráfico de cambio neta por cobertura	29
Figura 15. Comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación de las crecidas seleccionadas.....	30
Figura 16. Amenaza de incendio para la cuenca del estero Nonguén año 2017.....	34
Figura 17. Cartografía de amenaza de incendio forestal para la cuenca del estero Nonguén	35
Figura 18. Escenario de cobertura de suelo post-incendio forestal.....	36
Figura 19. Crecida simulada para Escenario post-incendio forestal.	37
Figura 20. Gráfico de comparación de escorrentía directa en condiciones normales de suelo y post-incendio forestal.....	37

Agradecimientos

Abstract

Floods are a natural process related to a sudden rise of the flow in response to the spatial and temporal distribution of rainfall or other detonators in a watershed; the peaks in a flood can vary in time due to several factors (e.g.: increased urbanization, vegetation cover changes, etc.). In this study, an analysis of the change of the land cover in the Nonguén watershed was carried out (36°49'–36°54' S, 72°57'–73°01'O), specifically in the 1987 – 2017 period. Subsequently, a calibration of the most significant floods was made through the HEC – HMS program for the 2016 – 2017 period and, finally, a flood for a future scenario post forest fire was simulated and the changes in the flood level and runoff was determined.

In accordance with the change in land use/land cover in the watershed (LULC), the main observed changes corresponded to the loss of native forest in 1300 ha, prevailing during this period in the Parque Nacional Nonguén main focus of the Mediterranean sclerophyll forest of the watershed. Native forest was replaced by vast monoculture plantations, specifically *Pino Radiata* and *Eucalyptus Globulus* since 1974, being now the dominant cover in the watershed. Finally, the urbanization gradually increased through the building of condominiums and building taking the river plain of Nonguén River since 1988 up to date.

The results of the calibration of a flood, made with the HEC – HMS program, determined the adjustment of 4 floods in the 2016 – 2017 period (July 17, 2016; July 25, 2016; May 7, 2017 and May 14, 2017), these gave a NSE index that varied between 0.73 and 0.85 which corresponds to a good calibration. In accordance with the adjustment of the hydrological parameters of the flood, the sensibility index indicated that the parameter that varied more during the calibration of the model was the SCS method of the Curve Number because it caused large fluctuations in the flow. Finally, the simulation of a flood based on a future scenario post forest fire gave a NSE validation index of 0.85. The results of the simulation determined that with a scenario in which a 36% of the burned watershed, as in 2017, the flood increased its flow in a 55% regarding the measured flow without forest fire. The results of this study are satisfying since the HEC – HMS program can be used as a tool for the generation of measurements in the management and control of flood events in the area through the inclusion and resolution of measurements in the integrated management of land and the protection of buffer zones such as wetlands and riparian areas.

Keywords: Floods, LULC, HEC – HM Software, Nonguén, Forest Fire

Resumen

Las crecidas son un proceso natural relacionado a un aumento repentino de caudal en respuesta de la distribución espacial y temporal de las precipitaciones u otros detonantes en una cuenca, los picos de crecida pueden variar en el tiempo por diversos factores (eg. aumento de urbanización, cambios de cubierta vegetal, etc). En este estudio se hizo un análisis de cambio de cobertura de suelo en la cuenca del estero Nonguén (36°49'–36°54' S, 72°57'–73°01'O) en el periodo 1987 -2017, posteriormente se realizó la calibración de las crecidas más significativas mediante el programa HEC-HMS para el periodo de lluvias 2016 – 2017 y, finalmente, se simuló una crecida para un escenario futuro post incendio forestal y se determinaron los cambios en el volumen de la crecida.

En relación con los cambios de uso/coberturas de suelo (LULC), las principales variaciones observadas correspondieron a la pérdida del bosque nativo en 1300 ha; persistiendo durante ese periodo de tiempo en el Parque Nacional Nonguén, principal foco de bosque esclerófilo mediterráneo de la cuenca. El bosque nativo fue remplazado por extensas plantaciones de monocultivo de *Pino Radiata* y *Eucalyptus Globulus* desde 1974, siendo ahora la cobertura dominante en la cuenca. Finalmente, la urbanización tuvo un paulatino aumento ocupando las llanuras fluviales del estero Nonguén desde 1998 con la construcción de viviendas.

Los resultados de la calibración de una crecida mediante el programa HEC-HMS, determinó el ajuste de 4 crecidas en el periodo 2016 – 2017 (17 de julio del 2016, 25 de julio del 2016, 7 de mayo del 2017 y 14 de mayo del 2017) las cuales dieron un índice de validación *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE) que varió entre 0.73 y 0.85 que corresponde a una buena calibración. De acuerdo con el ajuste de los parámetros hidrológicos de las crecidas, el índice de sensibilidad entregó que el parámetro que varió más durante la calibración del modelo fue el método SCS de Curva Número debido a que generó grandes fluctuaciones en el caudal. Finalmente, la simulación de una crecida en base a un escenario futuro post incendio forestal, entregó un índice de validación NSE de 0.85. Los resultados de la simulación determinaron que con un escenario de un 36% de la cuenca quemada en el año 2017, la crecida aumentó su caudal en un 55% respecto del caudal medido sin incendio forestal. Los resultados de este estudio son satisfactorios ya que el programa HEC-HMS puede ser utilizados como herramienta y generar medidas en el control y gestión de eventos crecidas en la zona mediante la inclusión y resolución de medidas en el manejo integrado del suelo y a la protección de zonas de amortiguación como humedales y zonas ribereñas.

Palabras claves: Crecidas, LULC, *Software* HEC-HMS, Nonguén, Incendio Forestal

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Las crecidas son un proceso natural que se originan a partir de intensas precipitaciones u otros detonantes, y están categorizadas como el desastre más devastador a escala global debido a su alta frecuencia (Ohl & Tapsell, 2000). Los factores condicionantes de este fenómeno son variados; los efectos de topografía y tipo de suelo son insignificantes a corto plazo, por lo que los cambios en la cobertura de suelo es el factor clave en la modificación de los procesos de escorrentía (Saghafian *et al.*, 2008).

El cambio de cobertura de suelo (*Land Use/Land Cover change LULC*) en las cuencas hidrográficas se genera a partir del rápido crecimiento de las poblaciones y el desarrollo intensivo de las actividades económicas en el territorio (Jacobson, 2011). La formación de grandes ciudades con una extensa superficie impermeable, anula la capacidad de infiltración del suelo lo que genera, en días de tormenta, un aumento en la escorrentía superficial en un 95%. La transformación de bosque nativo en áreas de cultivo y ganadero aumentan la tasa de erosión lo que se traduce en un aporte de un 45% en la cantidad de sedimento y escorrentía en los arroyos (Benítez en Martínez de Azagra, 2006), finalmente, en las zonas de plantación forestal, la escorrentía y sedimento puede llegar a aumentar en un 50% (Banfield *et al.*, 2018).

Estos cambios drásticos en los procesos hidrológicos e hidráulicos aumentan los volúmenes de escorrentía y los *peak* de máxima descarga en eventos de crecidas (Miller *et al.*, 2002; Sanyal *et al.*, 2014; Zope *et al.*, 2015). Sanyal en Zope (2016) concluye que, en la cuenca de Konar, India, los cambios del *LULC* entre los años 1976 y 2004 generaron un incremento sustancial en las descargas máximas de 1023,3 m³ a 1194,7 m³ y disminuyó el tiempo de retardo a 1h y 10min (Zope, 2016), lo que forjó un aumento en la severidad de las crecidas en el sector (Jacobson, 2011; Gilroy & McCuen, 2012; Lacher *et al.*, 2019).

El estudio de los efectos del *LULC* sobre la escorrentía superficial han sido tema de investigación en los últimos años, por lo que la modelación hidrológica se ha vuelto una herramienta para el estudio de crecidas (Miller *et al.*, 2002; Younis & Ammar, 2017; Zope *et al.*, 2016). Existen múltiples tipos de modelos hidrológicos, sin embargo, el *Hidrologic Engineering Center-Hidrologic Modeling System (HEC-HMS)* del *US Army Corps of Engineers* es el más representativo, ya que es un programa computacional gratuito y de amplia utilización internacional en el estudio de crecidas (López *et al.*, 2012; Saghafian & Farazjoo, 2008; Younis & Ammar, 2017). Para la utilización de estos modelos, es necesario contar con una amplia base de datos de información espacial, por lo que los sistemas de información geográfica

(SIG) y sensoramiento remoto se convirtieron en una herramienta primordial, ya que permiten incorporar las características fisiográficas de las cuencas a través de múltiples capas de información (imágenes satelitales, modelos de elevación digital, vectores, etc.) a distinta resolución espacial, lo que facilita la interpretación y la distribución espacial de los parámetros hidrológicos que deben ser añadidos al modelo (Fernández & Peña, 2016; Mahmoud, 2014). Actualmente los SIG y los modelos hidrológicos son utilizados para la prevención de inundaciones, además, los resultados ofrecen un grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la planificación territorial en torno a las zonas de riberas o para exigir criterios para el diseño de infraestructuras hidráulicas capaces de soportar crecidas e inundaciones en situaciones de emergencia (Pacheco, 2012).

Los SIG y la modelación hidrológica han sido utilizados en estudios en la zona centro-sur de Chile, los que hacen referencia a los efectos del cambio de cobertura de praderas y bosque nativo a plantaciones forestales, tala rasa y procesos de urbanizaciones sobre la escorrentía superficial y el recurso hídrico (Aguayo *et al.*, 2016); esto pone en evidencia el potencial impacto que tienen estas transiciones de coberturas en las crecidas de los ríos en eventos de tormenta.

En este sentido, la frecuencia de inundaciones en la cuenca del río Andalién y estero Nonguén ha ido en aumento en los últimos años (Rojas, 2015), además, sufre de una fuerte degradación del suelo que afecta un 18% de su superficie producto de la devastación del bosque nativo para la plantación de amplias hectáreas de trigo y ganando desde el año 1900 a 1950, lo que generó una impermeabilización del suelo, erosión laminar, y formación de cárcavas (Banfield *et al.*, 2018; Jaque, 2008). Para 1999, el 55% de la superficie de la cuenca fue ocupada con plantación forestal principalmente por *P. radiata* a gran escala lo que redujo el bosque nativo costero a una tasa anual de 4.1% y aumentó el flujo de escorrentía superficial y sedimento entre 305 y 368 Kgha⁻¹ de material, respectivamente (Echeverría *et al.*, 2006; Oyarzún, *et al.*, 2011). El aumento en la frecuencia de los incendios forestales en los últimos años ha transformado el paisaje de la cuenca del río Andalién. Los incendios forestales ocurridos en el año 2017 quemaron el 46% de la superficie de la cuenca lo que causó efectos catastróficos en el ecosistema (MINAGRI, 2017) y amenazaron las principales instalaciones de captación de agua potable ubicadas en la Reserva Nacional Nonguén que suministra a gran parte de la población de la ciudad de Concepción.

De acuerdo con lo anterior, se deja en evidencia el objetivo principal de este estudio, es la calibración de un modelo hidrológico para la cuenca del estero Nonguén en diferentes condiciones de coberturas/usos de suelo, para ser utilizado como una herramienta para realizar escenarios futuros y facilite la toma de decisiones en las políticas y en la planificación del territorio para el control de inundaciones (Abdulkareem *et al.*, 2018).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Analizar los efectos de los cambios de uso/cobertura del suelo en crecidas de la cuenca del estero Nonguén.

2.2. Objetivo específico

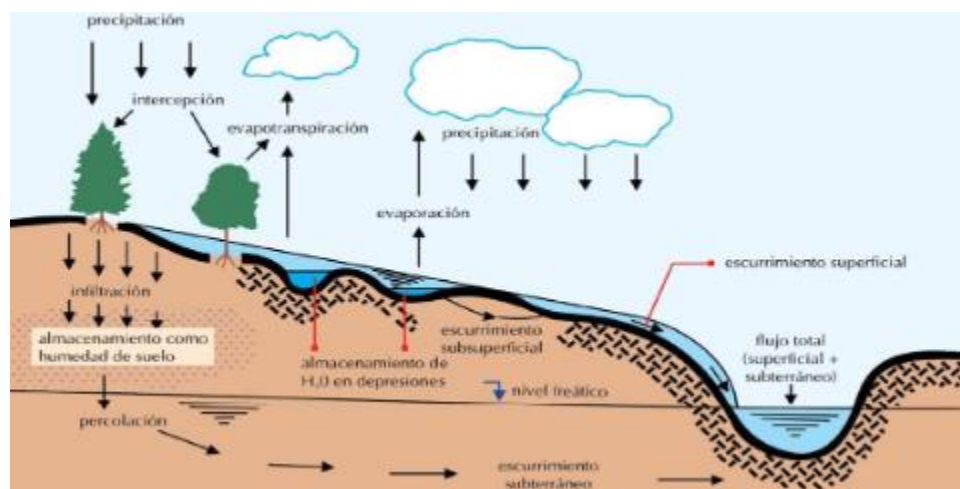
- Determinar los cambios de uso de suelo en la cuenca el estero Nonguén durante el periodo 1986 – 2017.
- Calibrar un modelo de precipitación-escorrentía para la cuenca del estero Nonguén.
- Simular un evento de crecida post evento de incendio forestal.

3. MARCO REFERENCIA

3.1. Escorrentía superficial y el ciclo de escurrimiento

El ciclo hidrológico (Figura 1) es la descripción general del flujo del agua a través de la interacción de la atmósfera, biosfera y litosfera en sus diferentes estados de la materia ya sea ascendente como evaporación y descendente como precipitación para posteriormente convertirse en escorrentía.

Figura 1. Ciclo hidrológico y escurrimiento



Fuente: Bassi, (2011).

Los flujos de agua que llegan a los cauces drenan a partir de la divisoria de aguas en las cuencas, y corresponden a los escurrimientos provenientes de la lluvia, nieve y/o deshielo, y se desplazan de forma superficial, subsuperficial y subterránea (Tabla 1).

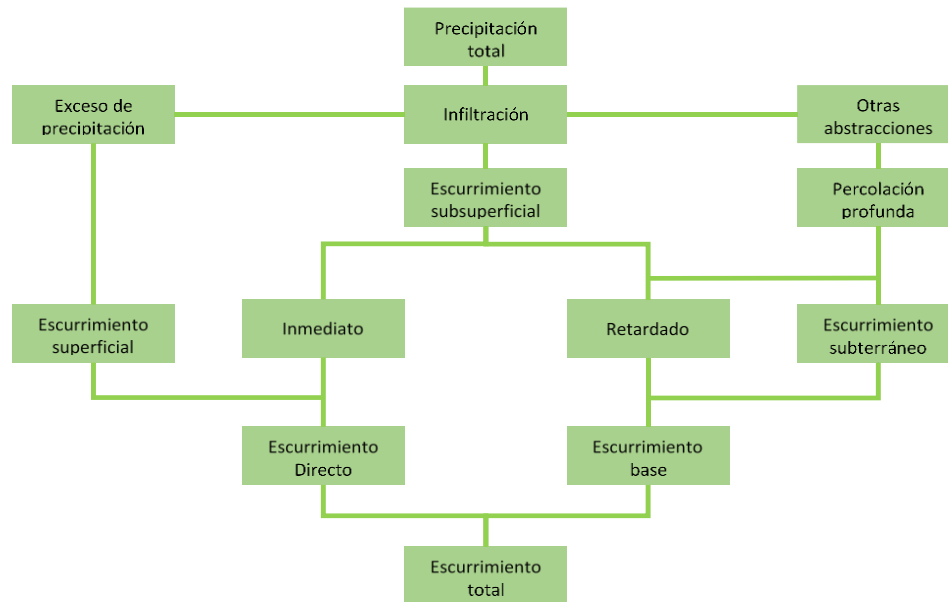
Tabla 1. Tipos de escurrimiento

Tipo de escurrimiento	Origen
Escurrimiento superficial	Agua que se desplaza por sobre la superficie del terreno hacia los cauces de mayor corriente. Este escurrimiento marca el exceso de la capacidad de infiltración del suelo.
Escurrimiento subsuperficial	Agua que se infiltra y se mueve lateralmente por los estratos más elevados hasta llegar al cauce. A veces este tipo de flujo antes de llegar al cauce aflora u se convierte en escurrimiento superficial.
Escurrimiento subterráneo.	Agua que se infiltra hasta los niveles freáticos moviéndose muy lentamente hasta enriquecer las corrientes superficiales.

Fuente: Murillo (2010)

Durante un evento de tormenta, la precipitación total tiene tres fases de transformación; la precipitación que se infiltra en el suelo se considerada como pérdida o abstracción y una parte de esta se escurre a través del subsuelo como escurrimiento subsuperficial. Una vez finalizada la abstracción del suelo tras saturarse el suelo, el exceso de precipitación denominada precipitación efectiva se transforma en escurrimiento superficial que fluye a través del relieve hasta llegar al cauce (Chow *et al.*, 1994).

Figura 2. Distribución de la precipitación en relación con las formas de escurrimiento



Fuente: Modificado de Murillo (2010)

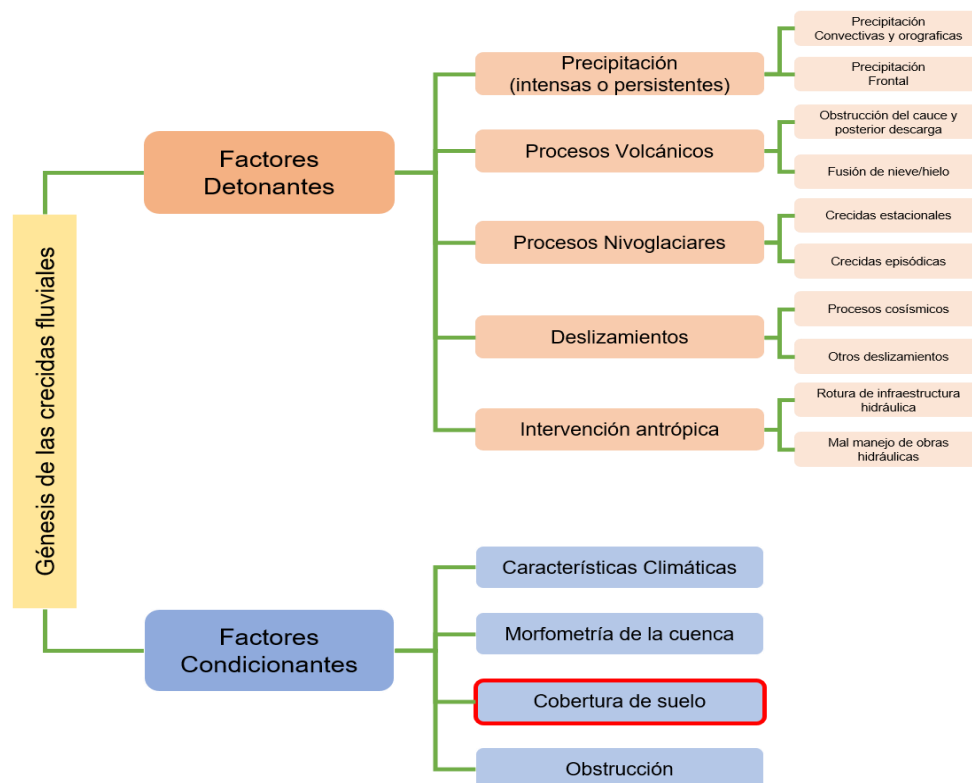
3.2. Crecida

Una crecida fluvial es un proceso natural, sin periodicidad y de grandes consecuencias ambientales, constituido por un ascenso importante y repentino del caudal de un río (Ollero, 1997). Rojas (2009) hace la distinción entre crecida e inundación, siendo esta última un proceso natural por el cual el flujo sobrepasa los límites del cauce, este proceso se relaciona generalmente con la cantidad y distribución en una cuenca. De esa forma una creciente puede o no causar una inundación, como también una inundación puede o no derivar de una crecida.

Este tipo de agitación en el comportamiento hidrológico de los ríos genera cambios ambientales importantes, sin embargo, esto depende del tipo de crecida. Están las crecidas ordinarias, que son aquellas que son de alta periodicidad y las extraordinarias que son de una menor frecuencia, pero de una magnitud mayor y superan los umbrales de resistencia de los sistemas fluviales y aceleran los procesos de erosión, transporte, sedimentación y ecológicos en la cuenca (Ollero, 1997).

Es preciso distinguir los procesos desencadenantes y condicionantes en la génesis de una crecida fluvial (Figura 3). En los procesos desencadenantes se diferencian diversas causas, tales como: procesos hidrometeorológicos, que están vinculados a los factores mismos que generan la escorrentía superficial, pero con otra intensidad (precipitaciones persistentes, lluvias intensas de corta duración); fusión de nieve y hielo, descargas de aguas represadas por glaciares, procesos de remoción en masa, rotura de embalses e infraestructura hidráulica y crecidas asociadas a erupciones volcánicas. En el caso de los condicionantes destacan: las características climáticas, morfometría de la cuenca, obstrucción, siendo el cambio de cobertura del suelo (*LULC*) el factor más significativo (Rojas, 2015).

Figura 3. Factores detonantes y condicionantes en la generación de crecidas fluviales



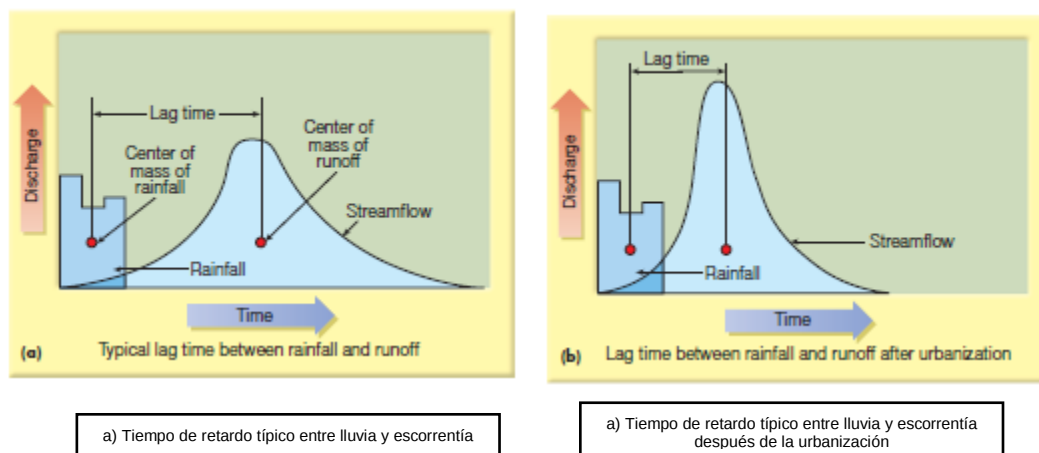
Fuente: Elaboración propia según a Rojas *et al.*, (2014)

3.2.1. Cambio de la cobertura de suelo y su impacto en las crecidas

El cambio de la cobertura de suelo o *Land Use/ Land Cover Change (LULC)* es un proceso complejo y dinámico que deriva de la interacción entre el sistema natural y el humano, lo que genera diversos problemas medio ambientales (Mölders, 2012). A nivel mundial se ha determinado que durante el período 1700 -1990, 1.206 millones de hectáreas fueron transformadas en terrenos agrícolas, 2.927 millones fueron convertidas en zonas de pastoreo para ganado. En conjunto, las actividades forestales y agropecuarias han causado un daño neto de 7 a 11 millones de km² de bosque nativo en último 300 años (Aguayo *et al.*, 2009; Aguayo *et al.*, 2016). Estos cambios se han transformado en uno de los forzantes más importantes del cambio ambiental global y es considerado la primera causa de la alteración y degradación del suelo. La sobreexplotación del suelo vegetal modifica los procesos hidrológicos y, como consecuencia, disminuye la capacidad de generar suelo vegetal y la generación de nubes y lluvia (Miller *et al.*, 2002; Sanyal *et al.*, 2014).

A nivel de cuenca los cambios de uso de suelo han generado un efecto perjudicial en los procesos hidrológicos (evapotranspiración, infiltración, percolación, tasa de sedimentación, calidad de agua, escurrimiento superficial, recarga de aguas subterráneas) que afectan los “*peak*” de las crecidas (Abdulkareem *et al.*, 2018). Las consecuencias, se traducen en una alteración en el mecanismo y progresión natural de las crecidas (Figura 4) y un decrecimiento del tiempo de retardo en el hidrograma de crecida (Song, *et al.*, 2015). Como consecuencia, la velocidad de la descarga máxima aumenta, causando mayores pérdidas e incidentes a la población. Estos eventos se han observado durante intensas lluvias que sobrepasan considerablemente la capacidad de infiltración lo que genera que la superficie del suelo adquiera características impermeables (Gilroy & McCuen, 2012; Keller & Blodgett, 2007).

Figura 4. Desarrollo de una crecida pre y post urbanización



Fuente: Keller & Blodgett, 2007

- (a) El hidrograma muestra el tiempo de retardo normal y volumen de una crecida sin intervención en la cobertura. (b) En este caso, el hidrograma muestra como la urbanización disminuye el tiempo de retardo y aumenta el volumen de la crecida.
- (b) En las últimas décadas se han realizado una serie de reportes en los cuales se informa que, la deforestación, ya sea por urbanización, agricultura o suelo descubierto, produce una fuerte incidencia de crecidas e inundaciones debido al aumento de escorrentía y los *peak* de descarga. Para el manejo del impacto del LULC Change en una cuenca hidrológica para el control y predicción de crecidas potenciales, riesgo y peligro de inundación se necesita una mayor comprensión de los conocimientos y técnicas de evaluación como los modelos hidrológicos.

3.3. Modelación hidrológica

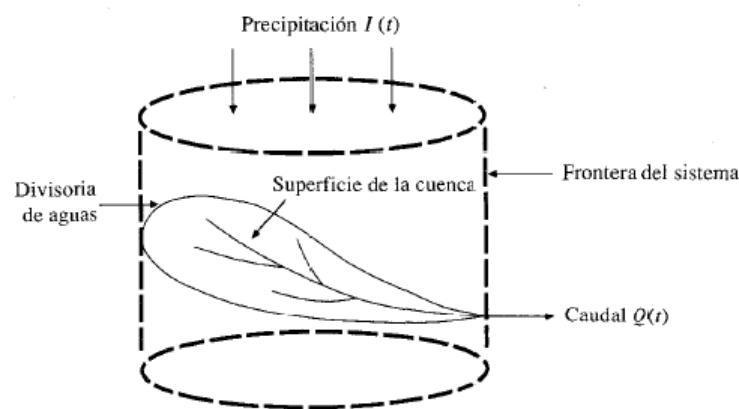
Los modelos hidrológicos son una herramienta para la comprensión y funcionamiento de una cuenca de drenaje, siendo el resultado del intento por conocer los procesos de transformación de la precipitación en escorrentía y de su capacidad de transportar sustancia en el flujo (Chow *et al.*, 1994; López, *et al.*, 2012; Weber *et al.*, 2013). Los modelos de última generación se considerados integrados debido a la capacidad que tienen de incorporar diversas capas de información del medio modelado.

Se puede definir un modelo hidrológico como una representación simplificada de la realidad de una cuenca con la función en un principio, de transformar la precipitación en escorrentía (Flores, 2018). Por lo tanto, si se sustituye la realidad de una cuenca por un sistema complejo lo que realiza el modelo es una simplificación de un sistema complejo, el cual describe todos los componentes básicos y más

importantes del sistema, tratando de representar de manera acertada ciertas semejanzas de las características reales de una cuenca (Pascual & Díaz, 2016).

Como punto de partida, las precipitaciones incidentes son la entrada al sistema “*input*”, que se distribuye en el espacio de la cuenca, el caudal es la salida, y es el resultado de la interacción entre los diferentes planos que ocurren dentro de los límites de la cuenca; el flujo que se concentra en el espacio del sistema hidrológico se cuantifica en la salida de la cuenca (Figura 5). Los procesos tales como la evaporación y el flujo subsuperficial también son salidas, sin embargo, si no contribuyen o intervienen como componentes al caudal modelado, se consideran como pérdidas que se escapan de los límites de la cuenca (Pascual Aguilar & Díaz Martín, 2016).

Figura 5. La cuenca de drenaje como sistema hidrológico



Fuente: Chow *et al.*, (1994)

A lo largo del tiempo, los avances de la modelación hidrológica se han centrado en la ampliación del estado simplificado de la cuenca, integrando los procesos intermedios y su relación entre las entradas y salidas del sistema (Avila, 2002). Esto se ha logrado a partir de la incorporación de los sistemas de información geográfica (SIG) al proceso de modelado a fines de siglo XX, ya que incorporan la componente espacial transformando el modelo lineal matemático a uno integrado capaz de interrelacionar varias capas de información que cumplen un factor primordial dentro de la cuenca, tales como la elevación, tipo de suelo, uso de la tierra, clima, etc. (Fernández & Peña, 2016). Además, las herramientas de modelación espacial en los SIG permiten estimar y generar la distribución espacial de parámetros hidrológicos a partir de la aplicación de diferentes técnicas geoestadísticas (Fernández & Peña, 2016).

Sin embargo, la calidad de simulación hidrológica dependerá de la capacidad que tiene el modelo de describir y representar con exactitud la diversidad de los sistemas hidrológicos a escala espacio-tiempo.

Así, el modelo puede simular el régimen del caudal natural en cualquier punto de la cuenca, siendo utilizado en distintas aplicaciones como: predicción de inundaciones (Llorente *et al.*, 2009), escasez hídrica (Sharma & Anjaeyulu, 1993; Choi & Deal, 2008), predicción de pérdida de suelo y erosión (Sharma & Singh, 1995), reconstrucción de serie de datos (Moreno & Salasar, 2008), reconstrucción de comportamiento en paleocauces (Conde & Baena, 2004) y ordenamiento territorial (Maza *et al.*, 1995).

Existe una gran cantidad de programas de modelos hidrológicos (Tabla 3). Los más desarrollados y generalistas abordan una amplia gama de escenarios de simulación, abarcando desde cuencas pequeñas y sucesos individualizados hasta drenajes a gran escala y flujo continuo; desde la escorrentía superficial hasta la combinación de transporte de sedimento y su interconexión con las aguas subterráneas. En esta investigación el programa a utilizar es el HEC-HMS, el cual es utilizado principalmente en el estudio de crecidas e inundaciones.

Tabla 2. Tipos de modelos para estimar variaciones de caudal.

Modelo	Variables de entrada	Referencia
<i>Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA)</i>	Uso de suelo, topografía, tipo de suelo y precipitación.	Arbuet, 2009
<i>BROOK90 hydrologic Model</i>	Precipitación, temperatura, velocidad del viento, cobertura de suelo y tipo de suelo	Khol, 2010
MIKE SHE	Topografía, precipitación, evapotranspiración, uso de suelo, flujo no saturado y perfiles de suelo.	Melih <i>et al.</i> , 2013; Akhter & Abul Hossen, 2014
<i>Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tool (N-SPECT)</i>	Tipo de suelo, cobertura de suelo, precipitación, erosividad y erodabilidad del suelo.	Paz, 2015
Número de Curva de SCS	Topografía, precipitación, uso de suelo, tipo de suelo y grupo hidrológico de suelo	López <i>et al.</i> , 2007; Sinisterra, 2014
SHETRAN	Precipitación, evapotranspiración potencial, tipo de almacenamiento y uso de suelo, resistencia del dosel, conductividad hidráulica, agua subterránea	Alonso, 2011
SIMED	Precipitación diaria, evapotranspiración mensual, propiedades del suelo.	MOP-DGA, 2010
<i>Soil and Water Assessment Tool (SWAT)</i>	Topografía, precipitación, temperatura, tipo de suelo, uso y cobertura de suelo.	Lie <i>et al.</i> , 2009; Sther <i>et al.</i> , 2010; Mango <i>et al.</i> , 2011; Chávez 2012
<i>Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry (THMB)</i>	Topografía, precipitación, temperatura, tipo de suelo, uso y cobertura de suelo.	Lie <i>et al.</i> , 2007
<i>The hydrologic Modeling System (HEC-HMS)</i>	Topografía, precipitación, temperatura, tipo de suelo y cobertura de suelo	Juárez <i>et al.</i> , 2009
<i>Variable infiltration Capacity (VIC)</i>	Precipitación diaria, descarga diaria, tipo y uso de suelo, topografía.	Hurkmans <i>et al.</i> , 2009
<i>Water Balance Simulation model (WaSim)</i>	Precipitación diaria, descarga diaria, tipo y uso de suelo, topografía.	Troncoso, 2009
<i>Water Erosion Prediction Project (WEPP)</i>	Valores diarios de precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad y punto de rocío, topografía, textura de suelo, coberturas y uso de suelo	Jorge, 2012
<i>Water Evaluation And Planning System (WEAP)</i>	Caudales afluentes, uso de agua y demanda agrícola.	Duque, 2013

Fuente: Modificado de Placencia (2018)

La ventaja de estos modelos de simulación es su comprensión y la organización de los datos requeridos como entrada, para ser incorporados a los algoritmos que comprenden en conjunto el modelo del sistema. Este ejercicio, a menudo puede guiar la recolección de los datos necesarios que mejoran la calibración del modelo, para una mejor representación de la cuenca (Bustamante, 2008). Otra ventaja es la gran cantidad de alternativas y esquemas, pues el desarrollo o el control de las crecidas pueden ser rápidamente probados y comparados con el modelo de simulación en algunos casos. La limitación principal de los modelos de simulación es la incapacidad para calibrarse correctamente y verificar aplicaciones en las cuales los datos de entrada faltan. La exactitud del modelo dependerá mayoritariamente de los datos de entrada y las observaciones disponibles de salida (Bendient & Huber, 2002).

3.3.1. Modelación hidrológica HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*) es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el *Hydrological Engineering Center* del *US. Army Corps of Engineers USACE*. Este modelo está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía en un punto de la red fluvial, producto de un evento de tormenta. Actualmente, este programa trabaja sobre la plataforma de Windows y contiene una serie de mejoras sobre su predecesor el HEC-1, algunas de estas son en la parte gráfica y en la forma de diseñar los proyectos, a través de elementos diseñados para la entrada de datos y a la salida de los resultados (Bustamante, 2008). Lo más novedoso de la actualización del programa es la interfaz gráfica del usuario que permite la manipulación de los elementos hidrológicos de una cuenca como ríos y la entrada de datos para la cuenca. La interfaz también permite visualizar de manera rápida los resultados de cualquier elemento del modelo esquemático e incluir *Shapes* que contienen las delimitaciones de las cuencas y los cursos de agua, desde una base SIG, como referencia visual, aunque no es utilizada en la modelación ya que solo sirve de referencia espacial (USACE, 2018).

Estudios realizados en Illinois, Estados Unidos, muestran la variabilidad que presentan las precipitaciones actualmente, sobre todo si afectan áreas urbanas propensas a inundarse. Se recopiló 100 años de registros meteorológicos de precipitación para poder ver los distintos efectos de las precipitaciones en los últimos años. En este sentido, el HEC-HMS, modelo precipitación - escorrentía, fue utilizado para ilustrar la evolución de los impactos relativos de las estimaciones de las precipitaciones, sobre los niveles máximos de inundación en 12 cuencas hidrográficas de la región. Los resultados de esta investigación beneficiaron a políticas de prevención de futuras inundaciones a escala regional; siendo utilizado el modelo HEC-HMS como una herramienta de predicción de inundaciones (Momcilo *et al.*, 2007; Knebl *et al.*, 2005).

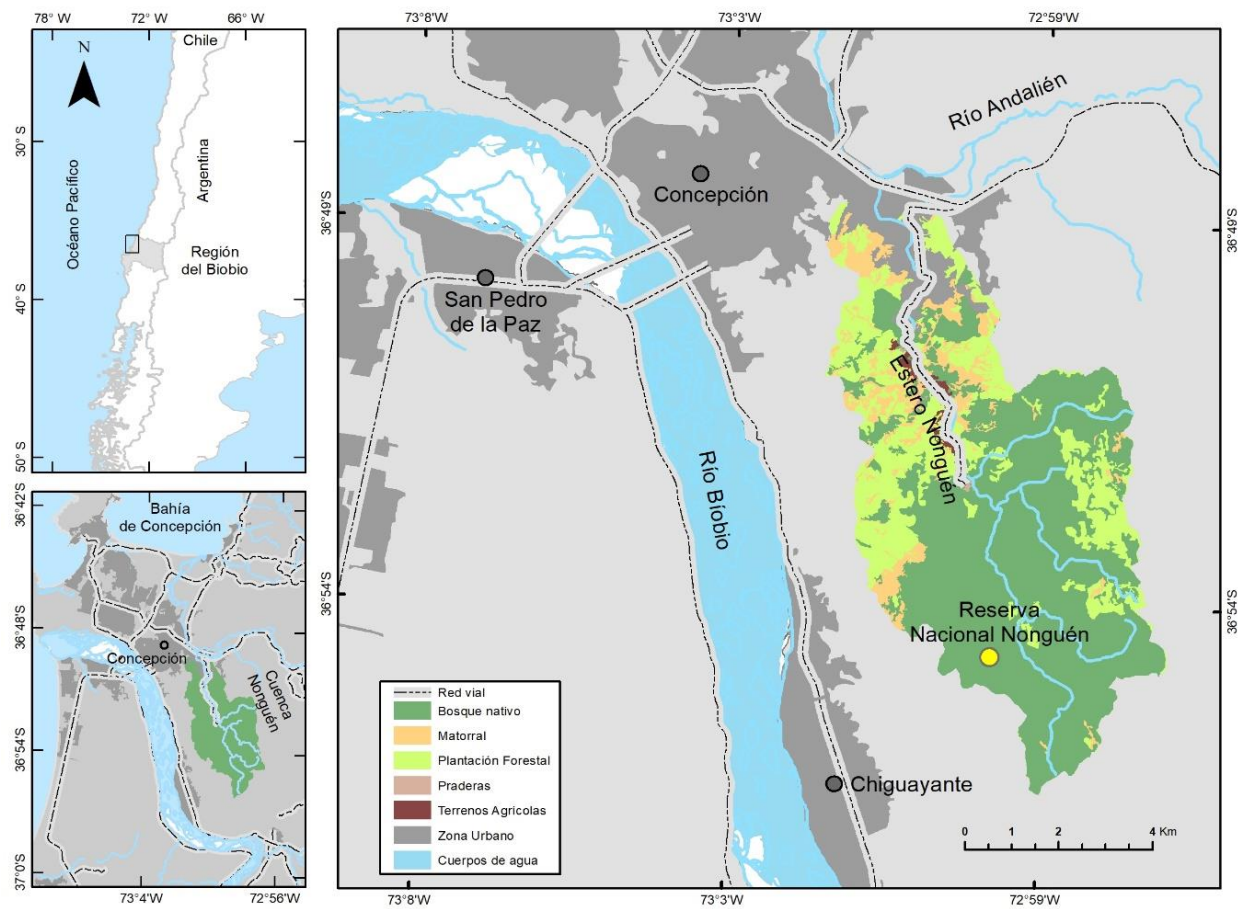
4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

La subcuenca del estero Nonguén ($36^{\circ}49'-36^{\circ}54'$ S, $72^{\circ}57'-73^{\circ}01'$ O) es el principal afluente de la sección inferior de la cuenca del río Andalién en el sector SO, en el Área Metropolitana de Concepción (AMC), región del Biobío, Chile (Figura 6). Es un sistema fluvial dendrítico de régimen pluvial de orden 3 con una superficie de 51 km^2 , con un caudal medio entre 0.5 y $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y en épocas de crecidas mayores puede llegar a aumentar hasta $83 \text{ m}^3/\text{s}$ en un periodo de retorno de 100 años (Correa & Salazar, 2014; Rojas *et al.*, 2017). Su clima se caracteriza por ser mediterráneo templado y presenta estaciones húmedas de 6 a 7 meses de duración seguida de una estación seca en verano; en el caso de las temperaturas, estas oscilan entre los 9°C – 20°C (Figura 7), las mínimas ocurren entre los meses de mayo y agosto y las máximas entre diciembre y febrero.

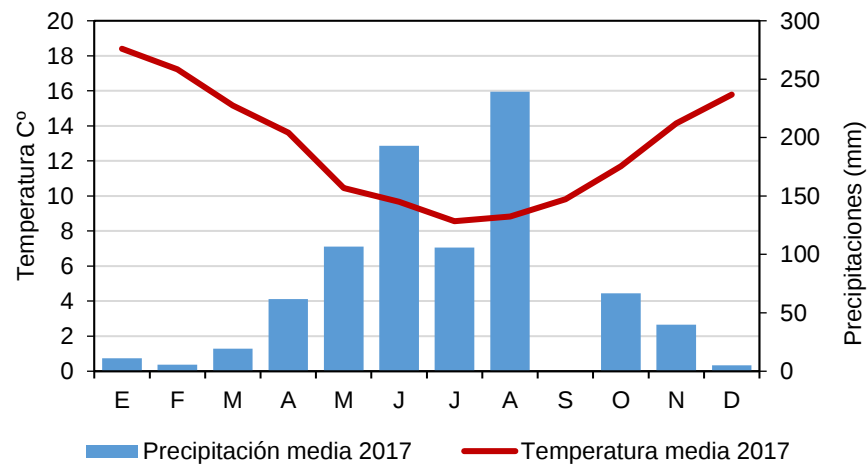
La cuenca está emplazada en el macrolleive de la Cordillera de la Costa, y como resultado, la red de drenaje se encuentra altamente controlada por la litología. Las formaciones rocosas compuestas principalmente por granito, presentan un fuerte diaclasamiento lo que facilita la degradación y la producción de arcilla (Chotin, 1979). Esto beneficia a la escorrentía superficial y al aumento de la erosión, favoreciendo la generación de procesos de deslizamientos y remociones en masas. La cuenca posee una diversa cantidad de especies correspondiente al bosque caducifolio que se concentra en la cabecera de la cuenca que pertenece a uno de los parques más importantes a nivel regional, el Parque Nacional Nonguén (CONAF, Parques Nacionales, 2020). La baja intervención en esta zona hace propicia la extracción de agua potable, la cual abastece a gran parte de la ciudad de Concepción, sin embargo, en las zonas de valles y desembocadura, se evidencia deforestación, urbanización y canalización del estero lo que provoca un aumento en la escorrentía superficial y sedimento (Territorio Nonguén, 2017).

Figura 6. Carta de ubicación cuenca estero Nonguén



Fuente: Elaboración propia. Uso de suelo CONAF, 2015

Figura 7. Climograma cuenca estero Nonguén

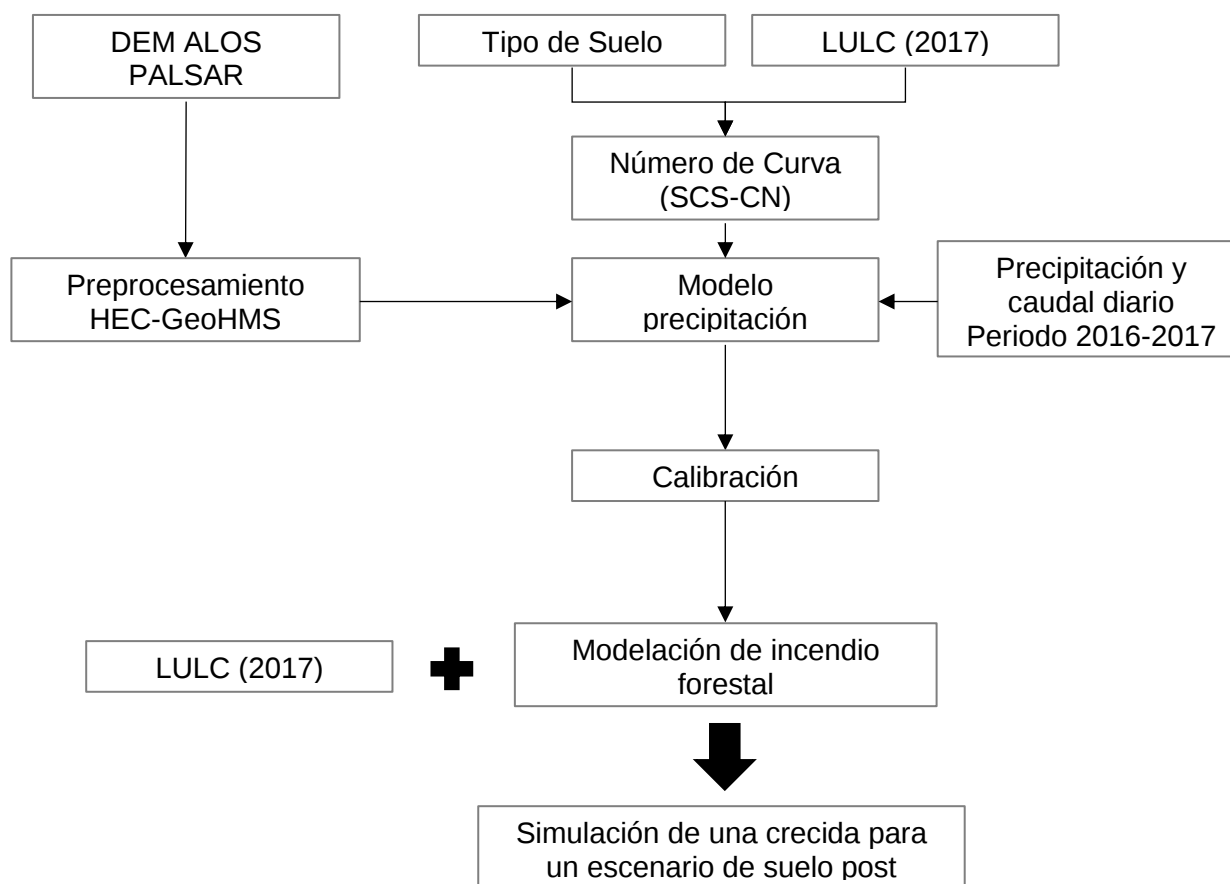


Fuente: Munizaga (2018)

4.2. Metodología

Para calibrar una crecida de la cuenca del estero Nonguén, se realizó un modelo de simulación de precipitación – escorrentía utilizando el modelo hidrológico HEC-HMS. En primer lugar, se elaboraron cartografías de uso de suelo y se determinaron los cambios experimentados durante el período 1987-2017. En segundo lugar, se construyó el modelo HEC-HMS en base a un modelo digital de terreno, uso de suelo, tipo de suelo y características hidrológicas para posteriormente ser calibrado y validado para el periodo de lluvias 2015-2016. Finalmente, se realizó una simulación de crecida para un escenario futuro post evento de incendio forestal.

Figura 8. Esquema metodológico general



Fuente: elaboración propia

4.2.1. Preprocesamiento y clasificación de imágenes satelitales para la detección de cambio de uso de suelo.

Se utilizaron imágenes satelitales Landsat las cuales fueron preprocesadas y clasificadas en la plataforma *online Google Earth Engine (GEE)*, que proporciona acceso directo de datos Landsat archivados como una colección del *USGS*. Las escenas utilizadas en este estudio correspondieron a los años 1987, 1998, 2011 y 2017 (Tabla 2) en épocas de verano (enero 01 – marzo 31), para mejorar la reproducibilidad de la clasificación y disminuir la cobertura de nubes en las imágenes. Al utilizar este tipo de imágenes multiespectrales es importante normalizar los datos para reducir el ruido resultante de los diferentes sensores por lo que se aplicó una serie de índices espectrales, *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* (Rouse *et al.*, 1973); *Enhanced Vegetation Index (EVI)* (Huete *et al.*, 2002); *Modified Soil-adjusted Vegetation Index (MSAVI)* (Qi *et al.*, 1994); *Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)* (Huete, 1988); *Normalized Difference Moisture (NDMI)* (Horler & Ahern, 1986); *Normalized Difference Water Index (NDWI)* (McFeeters, 1996); *Bare Soil Index (BSI)* (Li & Chen, 2014); y *Normalized Difference Bare-Land Index (MNDBI)* (Faridatul & Wu, 2018). Para disminuir la irradiación difusa de los píxeles generados por la topografía, se realizó la corrección topográfica según el método del factor de corrección C (Teillet *et al.*, 1982) y el modelo digital de elevación del *USGS* para distinguir entre los humedales y otro tipo de cobertura de suelo en zonas boscosas (Young *et al.*, 2017).

Tabla 3. Fuente de datos y descripciones

Datos	Referencia	Resolución espacial (m)	Fecha
Landsat 8 Surface Reflectance (SR), Landsat 8 TOA reflectance	Datos de Google Earth Engine (GEE) proporcionado por el U.S. Geological Survey (USGS)	30	2015 y 2017
Landsat 5 Surface Reflectance (SR), Landsat 5 TOA reflectance	Datos de Google Earth Engine (GEE) proporcionado por el U.S. Geological Survey (USGS)	30	1987, 1998, 2006 y 2011
Digital Elevation Model (DEM)	Datos de Google Earth Engine (GEE) proporcionado por NASA/USGS/ Jet propulsion Laboratory-Caltech	30	2000

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó el algoritmo de clasificación “*Classification and Regression Trees (CART)*” de la plataforma *GEE* para obtener las cartografías de cobertura del suelo para cada año elegido (Breiman *et al.*, 1984). La heterogeneidad del paisaje permitió identificar 7 clases de cobertura de suelo, usando como referencia la base de datos del Corine Land Cover (2018) (Tabla 3): (1) suelo agrícola, (2) plantación joven, (3) plantación forestal, (4) suelo descubierto, (5) matorrales, (6) bosque nativo y suelo urbano (7).

Se utilizaron alrededor de 450 puntos de referencia en cada uno de los años en estudio, considerando alrededor de 50 puntos por cobertura. Para la validación de los mapas de uso de suelo se utilizó el coeficiente kappa para medir la exactitud de la clasificación estadística, la cual se midió a través de una matriz de confusión usando en *Google Earth Engine*. El coeficiente kappa de las imágenes varió entre 0.93 y 0.88

Finalmente se realizó el análisis de detección de cambios de cobertura en el programa Terrset (Munizaga, 2015), el cual cuantifica los cambios de un mismo lugar en un periodo de tiempo determinado (Rojas *et al.*, 2013; Zamorano-Elgueta *et al.*, 2015).

Tabla 4. Clases de cobertura de suelo

Código	Uso de suelo	Descripción
1.	Tierras agrícolas	Cereales, horticultura y cultivos de frutas.
2.	Plantación joven	Plantación forestal < 5 años
3.	Plantación forestal	Plantaciones arbóreas compuestas por <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus</i> .
4.	Suelo descubierto	Suelo desprovisto de vegetación y rocosos
5.	Matorrales	Áreas que presentan menos de 25% de cubierta arbórea
6.	Bosque nativo	Ecosistemas compuestos por especies naturales que conforman una cubierta arbórea
7.	Urbanización	Ciudades y zonas industriales

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Modelo hidrológico HEC-HMS

La simulación de eventos de crecidas se realizó mediante el modelo hidrológico HEC-HMS, utilizado ampliamente en estudios de simulación de procesos de precipitación –escorrentía (López, y *et al.*, 2012; Estrada, 2012; Zubair Younis & Ammar, 2017; Abdulkareem *et al.*, 2018). El programa HEC-HMS está compuesto por tres modelos, cuenca, meteorológico y especificaciones de control. Además, cuenta con una extensión en Arcgis Hec-GeoHMS que permite acelerar la obtención e integración de datos fisiográficos al modelo (Ingol, 2016).

El modelo de cuenca (*Model Basin*) contiene los atributos físicos de la cuenca: características del suelo, pendiente, área, cobertura y uso de suelo. Las características del suelo fueron obtenidas a través de la cartografía de tipos de suelo de 1994 del Centro de Información de Recursos Naturales (CIEN, 1999) según las recomendaciones del *United State Departament of Agriculture* (USDA, 1986). Las pendientes, red de drenaje y área se obtuvieron a partir de un modelo de elevación digital de 12,5 m de resolución

obtenido del ALOS PALSAR del Alaska *Satellite Facility*. La cartografía de cobertura de suelo del año 2017 utilizada para calibrar el modelo se obtuvo a partir de la primera etapa.

El modelo meteorológico es una parte esencial de la simulación de escorrentía en eventos de tormenta, ya que calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca. Las precipitaciones utilizadas fueron obtenidas de una estación pluviométrica automática con registro cada 2 minutos del periodo 2016-2017 emplazada en la zona baja de la cuenca. Se utilizaron los datos fluviométricos diarios de la estación “Estero Nonguén frente U. del Bio Bio” 20 msnm (BNA N°08220008-8) de la Dirección General de Aguas (DGA) que está vigente desde el año 2014 a la fecha. Finalmente, los componentes de las especificaciones de control se refieren al tiempo de duración de la simulación, incluyendo la fecha, hora de comienzo y fin del proyecto de intervalo de cálculo.

Para simular las descargas en el modelo HEC-HMS se debe incorporar una serie de métodos que reflejen la información espacial, hidrológica y geomorfológica de la cuenca (Estrada, 2012). Para este estudio se utilizaron los siguientes métodos:

El modelo de pérdida, corresponde a la cuantificación de la capacidad de infiltración de la superficie del suelo. Para este modelo se seleccionó el método curva número desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS, 1972) de Estados Unidos que ha sido constante en estudios de crecidas (USDA, 1986; ferrér *et al.*, 1995; Lewis *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2013; Younis & Ammar, 2017; Abdulkareem *et al.*, 2018) y también, por su alta fiabilidad en los resultados en el extranjero y en estudios en Chile; específicamente en la región de la Araucanía y del Biobío (Stehr *et al.*, 2009; Stehr *et al.*, 2010; Martínez-Retureta *et al.*, 2020). Para cuantificar la curva número (CN) se necesitan parámetros de cobertura de suelo y tipo de suelo (características hidrológicas del suelo) ya que son factores que influyen en la generación de escorrentía de la cuenca. El valor de CN se encuentra en un rango de 0 a 100 donde 100 corresponde a una superficie impermeable y 0, a una superficie totalmente permeable con una alta capacidad de almacenaje. Para la estimación de la CN de la cuenca se realizó una recopilación bibliográfica para condiciones de humedad media de referencia para cada cobertura identificada en la cuenca, que permitió obtener los valores CN medios de las distintas subcuencas (Tabla 6).

Tabla 5. Recopilación bibliográfica de valores grupo hidrológico de suelo (GHS) para las clases de uso de suelo

<i>Uso de suelo</i>	<i>PctA</i>	<i>PctB</i>	<i>PctC</i>	<i>PctD</i>	<i>Referencia</i>
<i>Suelo descubierto</i>	71	80	85	88	Kumar et al (1991)
<i>Suelo urbano</i>	57	72	81	86	Muller (1986)
<i>Suelo agrícola</i>	58	61	73	75	Jullian (2018)
<i>Plantación joven</i>	45	66	77	83	Ferrer (1995)
<i>Plantación forestal</i>	35	55	70	77	Sther (2010)
<i>Matorrales</i>	49	69	79	84	Müller (1986)
<i>Bosque nativo</i>	45	66	77	83	Sther (2010)

Fuente: Elaboración propia

El modelo de transformación hace referencia a la generación del hidrograma en el punto de drenaje de una cuenca como consecuencia de la circulación de la lluvia efectiva a través de la superficie de la cuenca. En este estudio, se seleccionó la técnica de diagrama unitario Adimensional del SCS por ser un método sencillo y ampliamente utilizado en este tipo de casos (Zubair Younis & Ammar, 2017; Rodríguez, 2017; Duque *et al.*, 2019; Carrera *et al.*, 2013). Finalmente, para la circulación y propagación de las avenidas a través de la red de drenaje de las subcuencas, se utilizó el método Maskingum, técnica hidrológica más difundida para manejar relaciones variables de descargas - almacenamiento.

Finalmente, se consideró solamente la componente de flujo superficial directo, por lo tanto, es preciso estimar el flujo base y separarlo del hidrograma de caudal observado en el fluviómetro para poder compararlo con el simulado en el modelo, utilizando la metodología propuesta por Eckhardt y Posavec (Eckhardt, 2005; Posavec *et al.*, 2006).

4.2.3. Calibración del modelo HEC-HMS

La calibración es esencial en el modelo hidrológico ya que ajusta los parámetros hidrológicos del modelo para que en los hidrogramas obtenidos en la simulación disminuya el margen de error en contraste con lo observado en los hidrogramas en la cuenca. El margen de error se midió a través del *nash sutcliffe efficiency index* el cual se utiliza para evaluar la habilidad predictiva del modelo, valores iguales o superiores a 0.65 indican una buena calibración. La calibración del modelo HEC-HMS se efectuó en dos fases: primero, se ajustan los parámetros del modelo usando la técnica de prueba y error, observando de manera visual que el hidrograma simulado se ajuste al observado, y segundo, mediante a la utilización de la herramienta de optimización automática del estero Nonguén considerando 4 eventos de tormenta presentados en la cuenca. La calibración se realizó con los eventos ocurridos el 16 y 20 de julio del 2016 y el 5 y 12 de mayo del 2017.

4.3. Simulación de una crecida para un escenario de LULC post incendio forestal

Para la simulación de los caudales para un escenario hipotetico post evento de incendio forestal se realizó un modelo de peligro de incendio forestal que ha sido utilizado por diversos autores (Etxeberría, 2002; Adasme, 2018; Jaque *et al.*, 2019). El modelo está compuesto de dos componentes que son la variable natural y la antrópica. En el caso de la variable natural, esta está constituida por tres factores: inflamabilidad, insolación y altitud. En cambio, las variables antrópicas están vinculadas a las diferentes coberturas de suelo en este caso para el año 2017 y el medio construido que hace referencia a líneas de alta tensión caminos, etc.

4.3.1. Variables naturales

La variable de inflamabilidad es la capacidad que tiene la vegetación de desencadenar el fuego y favorecer su extensión (Alcaraz, 2012), esta se calculó a partir de los de los índices espectrales NDII y NDVI para obtener la inflamabilidad final (tabla 7). La componente de insolación determina la facilidad para el inicio de la propagación del incendio y permite identificar las zonas con mayor radiación solar durante un periodo determinado (Chuvienco, 2002). Este insumo se elaboró a partir de los mapas de pendiente y orientación (tabla 7). Por último, la variable altitud, fue generada a partir del DEM ALOS PALSAR (tabla 7).

Tabla 6. Niveles de peligrosidad de las variables naturales

Variables	Clasificación de valores	Grado de peligro
<i>Normalized Difference Infrared</i> (NDII)	-1 – 0	Bajo
	0 – 0.3	Medio
	0.3 – 1	Alto
<i>Normalized Difference Vegetation index</i> (NDVI)	-1 – 0	Bajo
	0 – 0.3	Medio
	0.3 – 1	Alto
Factor de insolación	< 0.6	Bajo
	0.6 < Factor < 1.15	Medio
	Factor > 1.15	Alto
Altitud (m)	25 – 175 msnm	Bajo
	175 – 325 msnm	Medio
	325 – 438 msnm	Alto

Fuente: Modificado de Adasme (2018)

4.3.2. Variable antrópica

Para la variable de cobertura de suelo se utilizó la cartografía de LULC resultante que correspondió al año 2017, cada cobertura fue clasificada según el grado de peligro de incendio que representan (alto medio y bajo). Finalmente, para analizar aquellas áreas que pertenecen al medio construido y que son elementos que pueden favorecer el avance del fuego se aplicó un buffer de entre 300 y 500 metros a los elementos tales como carreteras, ferrocarriles, caminos y líneas de alta tensión (Etxeberría, 2002).

Tabla 7. Amenaza según elementos antrópicos

Variable antrópicos	Valor de peligro	Reclasificación de peligro
Elemento antrópico		
Líneas de alta tensión	3	Alto
Caminos	20	Medio
Cobertura de suelo		
Zona urbana	1	Bajo
Suelo descubierto	1	Bajo
Plantación forestal	3	Alto
Bosque nativo	2	Medio
Plantación joven	3	Alto
Matorrales	3	Alto
Agricultura	1	Bajo

Fuente: Modificado de Adasme (2018)

Una vez obtenidos los resultados de las variables, estas fueron normalizadas para posteriormente proceder a la elaboración de la cartografía de incendio en base a la metodología de Etxeberría *et al.*, (2002). Dentro de esta, se encuentran cuatro índices que deben calcularse mediante una fórmula, cabe mencionar que estos índices tienen distinta importancia dentro del algoritmo.

$$PI = 4V + 3H + 2I - A$$

Dónde;

PI, es el peligro de incendio; V, es el factor vegetación (inflamabilidad); H, el factor humano (cobertura de suelo y medio antrópico); I, factor insolación, y A, factor altitud.

Una vez elaborada la cartografía de amenaza de incendio forestal, se procedió a validar el modelo utilizando los puntos de ocurrencia histórica entre el año 2010 y 2019. Esto permitió verificar que tan

preciso fue el modelo cartografiado comparando los puntos de ocurrencia con las zonas de mayor peligrosidad de incendio forestal.

4.3.3. Simulación de una crecida para un nuevo escenario de incendio.

Al validar el modelo de peligro de incendio, se seleccionó la categoría de mayor peligrosidad para ser incorporada como una nueva cobertura identificada como una posible área quemada a la cartografía de cobertura de suelo del año 2017 creada en la etapa 1. Una vez establecido el nuevo escenario, a las zonas quemadas se les asignó un valor CN = 94 según Okonski (2007), para posteriormente calcular el valor CN total para la cuenca a través de la extensión en Arcgis Hec-GeoHMS. Finalmente, para la simulación de la crecida se utilizaron los parámetros de la crecida con mejor índice NSE calibración en el modelo HEC-HMS cambiando solamente el valor CN de la cuenca para así simular la progresión de la crecida, los tiempos y su caudal, comparando los resultados del estado inicial para observar los cambios generados.

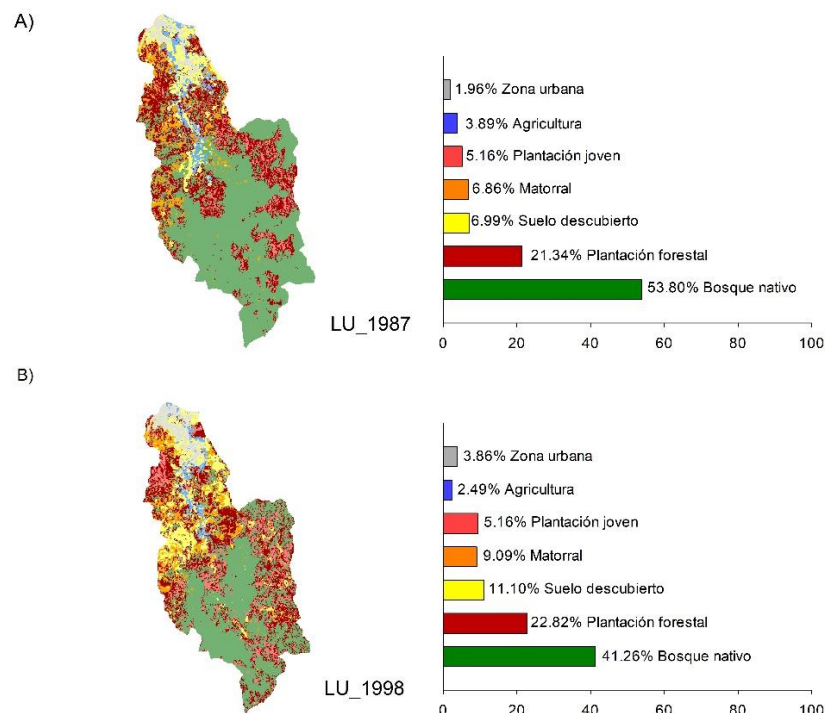
5. Resultados

5.1. Análisis de detección de cambio de cobertura de suelo

De acuerdo con los mapas temáticos (Figura 9), se obtuvo los principales *LULC Change* en la cuenca del estero Nongún en el período 1987 y 2017.

En 1987 se pudo observar que la cobertura dominante en la cuenca fue bosque nativo (54%), el cual se concentró principalmente en la cabecera de la cuenca y en la zona media de manera fragmentada. La plantación forestal a través del D.F.L.701 que fomentó su sobreforestación en la zona centro-sur de Chile durante los 80's, fue importante, ya que fue la segunda cobertura de mayor superficie (21%) con plantaciones. El suelo urbano se ha desarrollado principalmente en las llanuras fluviales del estero Nongún y el río Andalién, con la construcción de la Universidad del Biobío en 1947 y el Estadio Ester Roa Rebolledo de la Avenida Collao en 1962, anteriormente llamado el barrio Puchacay (figura 10). La urbanización se intensificó en los 80's, en las zonas aledañas al estadio y la universidad, con la formación de pequeños barrios como la Villa el Huáscar y Los Lirios; proceso que persistió en los 90's a mayor escala con edificaciones de mediana altura y amplios condominios que fueron afectados por los eventos de inundación del año 2002 y 2006 (figura 10).

Figura 9. Coberturas de suelo de la cuenca del estero Nongún A) 1987, B) 1998, C) 2011 y C) 2017



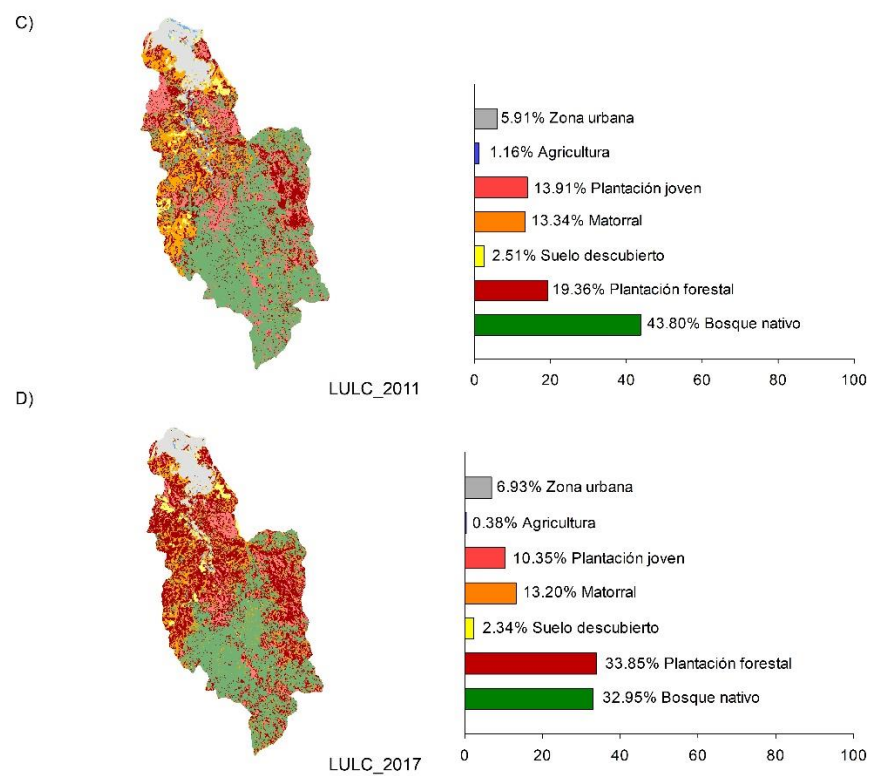


Figura 10. Sector estadio Ester Roa Rebolledo y Universidad del Biobío afectados por inundación del año 2006



Fuente: Resumen.cl, (2020).

Al año 2017 la situación del bosque nativo cambió drásticamente, ya que disminuyó su superficie de 2770 ha a 1697 ha (alrededor de un 7%), convirtiéndose a otras clases de cobertura de suelo, principalmente a plantación adulta y matorral, mediante procesos de deforestación del bosque. Sin embargo, se pudo observar que en la cabecera de la cuenca existe una persistencia del bosque nativo, posiblemente vinculado a la creación de la Reserva Nacional Nonguén en 2009, hoy declarado Parque Nacional. Esta zona, resguarda el ecosistema del bosque caducifolio mediterráneo templado costero, el cual posee una alta riqueza de especies de flora y fauna; especies arbóreas como el Hualle (*Notofagus Obliqua*), Coigue (*Notofagus dombeyi*), Arrayanes (*Luma apiculata*), Boldales (*Peumus boldus*), Litrales (*Lithraea caustica*), al igual que diversas especies de aves y mamíferos como el Chucaco, loicas, zorro culpeo, guiñas, pudúes y el monito del monte.

Figura 11. Flora y fauna de Parque Nacional Nonguén



Fuente: Territorio Nonguén (2017)

La plantación forestal, para el año 2017, aumentó su superficie considerablemente de 997 ha a 1743 ha, al deforestar el bosque nativo y matorrales en el área, reforestando con *Eucalyptus Globulus* y *Pinus radiata* a lo largo de toda la cuenca limitando por el sursureste con el Parque Nacional Nonguén y al noroeste con las poblaciones del valle Nonguén. Por otro lado, el suelo urbano aumentó considerablemente su superficie (6.93%) en comparación al año 1998 localizado principalmente en la llanura fluvial del estero, el que fue canalizado el año 2009 en un tramo de 2.3 Km hasta su confluencia con el río Andalién. En temporada de lluvias, las poblaciones de Ríos de Chile y el nuevo barrio privado Nonken se anegan, debido a las condiciones físicas del terreno donde fueron emplazadas (eg. Pendientes bajas y zonas de humedales). Hacia el interior se observaron procesos recientes de

urbanización a través de parcelas y condominios cerrados, los cuales colindan con el parque y las plantaciones forestales, en zonas expuestas a peligro de incendio forestal.

Figura 12. Población Villa Nonguén y barrio privado Nonken construidas en zonas de anegamiento y cercanas a plantaciones de Eucalyptus.



Fuente: Elaboración propia

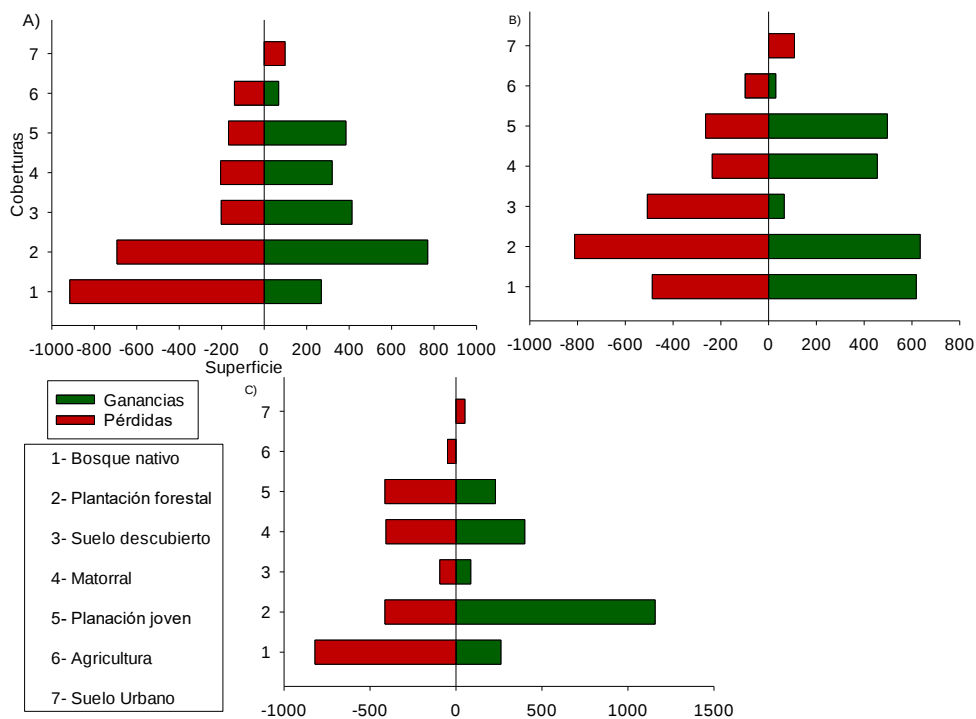
Según el análisis de cambio (Figura 13), el bosque nativo fue la cobertura que tuvo mayor pérdida bruta y mayor cambio neto. Entre 1987 y 1998, el bosque nativo experimentó las pérdidas más importantes con una reducción del cambio neto de 646 ha (6,67%). Entre 1998 y 2011 se observó una ganancia de 618 ha por lo que hubo un aumento neto de 131 ha (1,35%). Finalmente, del 2011 al 2017 se observó una pérdida de bosque nativo de 820 ha, cifra que se asemeja a los valores obtenidos entre 1987 y 1998, que se tradujo en una disminución neta de la cobertura de 559 ha (5, 77%).

La plantación forestal fue la que presentó mayor ganancia bruta entre todas las coberturas, y también, la de mayor cambio neto. Los valores de ganancia y pérdida bruta entre 1987 y 1998 fueron de 770 ha y 693 ha, por lo que la diferencia neta tuvo un aumento de 76 ha (0,79%). De 1998 al 2011, la pérdida bruta de las plantaciones forestales fue de 812 ha producto de la tala y cosecha de plantaciones entre 12 y 30 años de edad, lo que produjo un descenso de su superficie neta de 178 ha (1,84%). Entre el 2011 y 2017 fue la cobertura que tuvo mayor ganancia en ese periodo con 1158 ha, siendo las pérdidas brutas de 412 ha, lo que resultó en una diferencia neta positiva de 776 ha (7,7%) correspondiendo también a la mayor contribución neta en ese periodo.

Entre 1987 y 1998, el suelo descubierto presentó pérdidas de 211 ha, que fueron menores a las ganancias brutas con 413 ha, por lo que la diferencia neta tuvo un aumento de 211 ha (2,18%), siendo el único periodo en el cual las contribuciones netas de esta cobertura resultaron positivas. De 1998 al 2011 la cobertura tuvo pérdidas que alcanzaron las 508 ha, mientras que las ganancias solamente fueron 65 ha. El suelo descubierto fue la cobertura que tuvo la mayor reducción de superficie de 446 ha (4,57). Finalmente, del 2011 al 2017, se observó que las ganancias y pérdidas brutas fueron similares, ya que la diferencia neta fue de solamente 9 ha (0,09%).

En el caso de los matorrales, hubo una ganancia bruta de 320 ha, mientras que las pérdidas brutas fueron de 205 ha, diferencia que representó un incremento de 115 ha (1,19%) en el periodo de 1987 y 1998. Entre 1998 y 2011, experimentó ganancias brutas de 455, siendo las pérdidas de 236 ha. Esto significó un incremento de la superficie neta resultante de 219 ha, fue el periodo en el cual los matorrales acumularon mayor superficie. Por último, las ganancias y pérdidas netas entre el año 2011 y 2017 fueron muy similares, con un cambio neto de 7 ha (0,08%).

Figura 13. Gráfico de pérdidas y ganancias por cobertura A)1987-1998 B) 1998-2011 C) 2011-2017

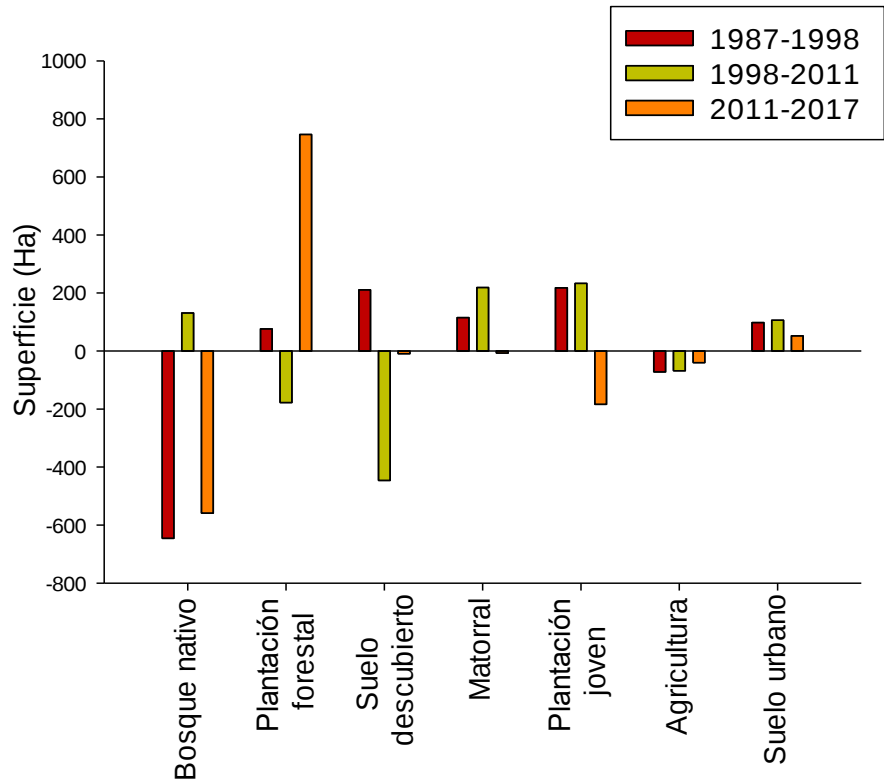


Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las contribuciones al cambio neto, los principales se dieron en el bosque nativo, que desde 1987 a 1998 perdió 12,5%, principalmente por procesos de deforestación, gran parte de este porcentaje pasó a formar parte de plantaciones forestales adultas (361 ha) y jóvenes (113 ha). Entre 1998 y 2011, se pudo observar una recuperación del bosque nativo de un 2,5%, con aportes mayoritariamente de las plantaciones forestales (158 ha), posiblemente esto está relacionado a la declaración de la zona alta de la cuenca como Reserva Nacional Nonguén en el año 2009. Finalmente, al año 2017, la cobertura de bosque nativo experimentó una reducción del 10,85%, pasando a ser parte de las plantaciones forestales (377 ha) y matorrales (158 ha), respectivamente. Posiblemente, este proceso de disminución del bosque nativo se vió vinculado a los eventos de incendios forestales del año 2014 y 2017, que devastaron un 46% de la cuenca del río Andalién (CONAF, 2017), zonas que posteriormente fueron reforestadas con monocultivos y especies arbóreas exóticas.

Finalmente, se observó un aumento paulatino de la cobertura urbana entre 1987 y 2017. Entre 1987 y 1998, se pudo observar que suelo urbano aumentó un 1.9%, siendo la cobertura de suelo descubierto (70 ha) y suelo agrícola (19 ha) las que aportaron mayor parte de su superficie. El cambio se focalizó principalmente en las cercanías del esteró Nonguén ocupando las llanuras fluviales en la construcción de condominios y edificaciones de mediana altura durante los 90's debido al boom inmobiliario. Entre 1998 al 2011 se registró el periodo con mayores contribuciones netas por parte del suelo descubierto (87 ha); y el suelo agrícola (13 ha). Se pudo observar que la urbanización ha continuado su ocupación en las llanuras fluviales hasta el punto de avanzar hacia el interior del valle y limitar con las zonas de plantación forestal, lo que genera nuevos escenarios de riesgo de incendio forestal. Finalmente, para el periodo 2011-2017, el suelo urbano tuvo aportes netos del suelo descubierto, suelo agrícola y los matorrales. La transición de los matorrales se relacionó a la construcción de parcelas y pequeños caseríos al interior de la cuenca cercanos al Parque Nonguén.

Figura 14. Gráfico de cambio neto por cobertura



Fuente: Elaboración propia

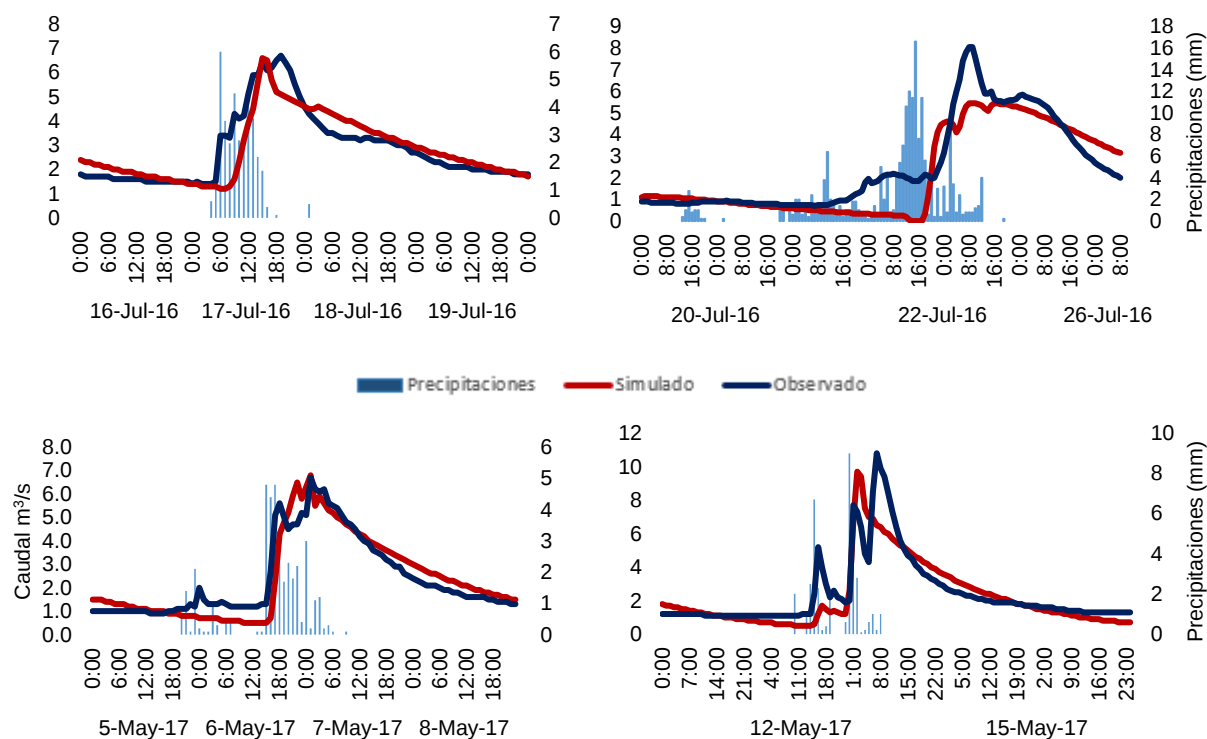
5.2. Resultados de calibración y simulación de crecidas en modelo HEC-HMS

Los resultados mostraron que los eventos de crecida del 20 de julio de 2016 y el 5 de mayo de 2017, de acuerdo con el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE), fueron los modelos más eficientes, los valores obtenidos fueron de 0.79 y 0.85 (Tabla 7). Respecto al evento del 20 de julio de 2016 en el cual cayeron 96.4 mm de precipitación, el hidrograma observado y simulado mostró, que el caudal pico simulado fue de 12.1 m³/s y fue similar al pico observado de 16.1 m³/s (Figura 15). Sin embargo, la estimación del momento del máximo caudal del evento ocurrió el 25 de julio 2016 a las 21:00 horas, en comparación al caudal máximo instantáneo observado en la parte baja de la cuenca que fue a las 08:00 del 24 de julio de 2016. Para el evento de crecida del 5 de mayo de 2017, cayeron 38.1 mm y el caudal máximo observado fue 6.7 m³/s. La tabla 9 muestra la estimación del tiempo pico en el evento en cuestión el cual fue el día 7 de mayo a las 02:00 AM el cual presentó una hora de diferencia en comparación al observado.

Tabla 8. Valores de los errores relativos y de la eficiencia NSE, obtenidos en la estimación de $Q_{\max}$ Tp (tiempo en punta) y en el volumen de escorrentía

Parámetros		Eventos			
		16-Jul-16	20-Jul-16	5-May-17	12-May-17
Precipitación		36.6	96.4	38.1	36.4
Caudal máximo $Q_{\max}$, m^3/s	Observado	6.7	16.1	6.4	10.8
	Simulado	8.9	12.1	6.7	9.7
	Dif. Abs	2,3	-24.8	-0.3	-1.1
	Dif. (%)	3.8	-4.0	-3.8	-10.2
Tiempo en punta	Observado (día)	17jul2016 19:00	25jul2016 21:00	07may2017 01:00	14may2017 07:00
	Simulado	17jul2016 17:00	24jul2016 08:00	07may2017 02:00	14may2017 03:00
Volumen (MM)	Observado	19.52	56.19	16.54	20.91
	Simulado	19.52	49.46	16.51	19.32
	Dif. Abs	-0.00	-6.72	-0.02	-1.59
	Dif. (%)	-0.02	-11.96	-0.13	-7.59
Eficiencia NSE		0.77	0.79	0.85	0.73

Figura 15. Comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación de las crecidas seleccionadas.



Fuente: Elaboración propia

Respecto a los parámetros de calibración utilizados para el ajuste de los hidrogramas (tabla 10), los resultados mostraron que el tiempo de concentración (T_c) que se define como el tiempo que demora una gota de lluvia en llegar a la desembocadura de la cuenca; se mantuvo estable en todas las simulaciones a excepción del evento del 5 de mayo de 2017 el cual presentó un índice de sensibilidad (IS) de -0.23 que se traduce como un cambio imperceptible en su ajuste. En el caso de los parámetros de enrutamiento maskingum, tanto el factor x y el k se mantuvieron estables en la totalidad de los eventos. Por el contrario, en relación con los parámetros del método SCS que miden la capacidad de infiltración de la cobertura y tipo de suelo de la cuenca el más sensible fue principalmente el número de curva (CN), con valores de sensibilidad entre -0.12 y 5.28 debido al ajuste que se realizó durante la calibración se aleja mucho del valor inicial. No así fueron las abstracciones iniciales (I_a), las cuales se mantuvieron estables casi en la totalidad de los eventos, a diferencia de la crecida del 16 de julio de 2016 que presentó un IS de 0.22.

Finalmente, los parámetros relacionados al flujo base, que mostraron mayores fluctuaciones durante la calibración de las crecidas fueron la constante de recesión, que representa a la disminución del flujo base en contacto con la escorrentía, con valores de IS que variaron entre -0.22 a 1.32, y el “*ratio to peak*” que es la relación entre el caudal base en el momento actual y el caudal base un día antes, que presentó variaciones entre -0.5 a 1.51. Por el contrario, la descarga inicial fue el parámetro que tuvo mayor estabilidad durante la calibración en la totalidad de las crecidas simuladas.

Según los resultados expuestos, se puede concluir que la metodología utilizada responde de forma adecuada a la cuenca en estudio. El método de curva del SCS es aplicable para cuencas de menor superficie ($<250\text{Km}^2$) resultados satisfactorios en la modelación de los caudales punta. Del análisis de sensibilidad, se determinó que los parámetros más sensibles en el modelo hidrológico fueron el número de curva y los parámetros hidrológicos relacionados al flujo base. Finalmente, los resultados mostraron que, del total de precipitación caída en la cuenca, el 15% generó escorrentía directa y el 85% se atribuye a abstracciones, condición dada por la presencia plantaciones forestales, bosque nativo y otras especies arbustivas que corresponden al 90% de la superficie de la cuenca.

Tabla 9. Resultados de calibración de los eventos de crecida

A) PARÁMETROS INICIALES

SUBCUENCA	Evento de tormenta	Parámetros SCS hidrograma unitario	Método muskingum		Método SCS		Método recesión		
W980REACH1		Tc(min)	X	K	Ia	CN	descarga inicial	Recesión	Ratio to peak
	16-Jul-16	119,4	0,2	0,1994	6,405	75,583	2,2043	0,15385	0,3
	20-Jul-16	119,93	0,2	0,1994	6,405	75,583	2,505	0,63385	0,85
	5-May-17	119,93	0,2	0,1994	6,405	75,583	1,6043	0,55385	0,9
	12-May-17	119,93	0,2	0,1994	6,405	75,583	1,9043	0,45385	0,8

B) PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

SUBCUENCA	Evento de tormenta	Parámetros SCS hidrograma unitario	Método muskingum		Método SCS		Método recesión		
W980REACH1		Tc(min)	X	K	Ia	CN	descarga inicial	Recesión	Ratio to peak
	16-Jul-16	112,88	0,13131	0,226	40,205	82,054	2,2473	0,5217	0,29677
	20-Jul-16	119,93	0,18824	0,039	6,5013	46,684	2,3577	0,59657	0,80001
	5-May-17	67,98	0,18824	0,074	13,664	69,715	1,5467	0,84869	0,48081
	12-May-17	11,,29	0,12805	0,039	6,405	56,543	1,7923	0,42838	0,75295

Fuente: Elaboración propia

5.3. Proyección de una crecida para una amenaza de incendio forestal

La evaluación de la amenaza de incendio forestal se llevó a cabo a partir de las dos variables que influyen en la ignición y propagación de los incendios: las variables naturales, en donde se consideró la inflamabilidad, insolación y altitud y las variables antrópicas, las que abarcan la cobertura de suelo y el medio construido de la cuenca.

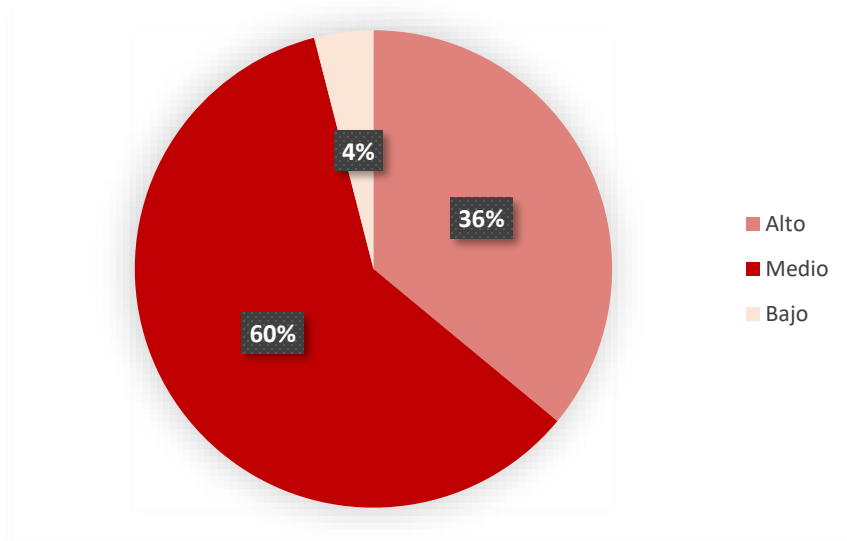
Los resultados obtenidos del cruce entre el NDII y el NDVI mostraron que 4893 ha (95%) de la cuenca presentaron un alto grado de amenaza de inflamabilidad, que se focalizó en la totalidad del Parque Nacional Nonguén y en las plantaciones estrechamente relacionados al estrés hídrico de la zona. En tanto, la amenaza media y baja concentraron 230 254 ha (5%) de superficie que están vinculadas principalmente a las zonas de suelo descubierto y urbano. La variable de insolación que se generó del cruce de la orientación y la pendiente, mostró que, 3499 ha (68%) tuvo un grado amenaza media y 1647 ha (32%) de amenaza baja, resultado relacionado con la presencia de pendientes altas.

Finalmente, la variable de altitud mostró que 2698 ha (52%) estuvo entre los 175 y los 325 msnm principalmente con un grado de amenaza medio; las llanuras fluviales y valles interiores concentraron 1807 ha (35%) con bajo nivel de amenaza entre los 25 y 175 msnm, por último, 641 ha (12%) corresponden a categoría alta, entre los 325 y 348 msnm que hace referencia a las zonas de mayor altitud de la cuenca.

De las variables antrópicas, por cobertura de suelo 2955 ha (57%) de la cuenca correspondieron a un alto nivel de amenaza vinculado principalmente a la plantación forestal adulta, joven y matorrales. El grado de amenaza medio se concentró en las zonas de cabecera de la cuenca, debido a la alta densidad de bosque nativo que tienen una menor capacidad de ignición y propagación del fuego en comparación a las plantaciones forestales (Abarca y Quiroz, 2005). Solamente 496 ha (10%) corresponden a un bajo nivel de amenaza relacionadas al suelo urbano, descubierto y agrícola. Finalmente, los resultados observados en la variable del medio construido, mostraron un bajo nivel de amenaza de 3200 ha (62%) que correspondieron principalmente a zonas con vegetación; los caminos forestales y rurales entraron en la categoría de amenaza media con 1640 ha (32%); y solamente 306 ha (6%), se encontraron en una categoría de alta amenaza debido a la presencia de una línea de alta tensión que atraviesa la cuenca de sur a norte.

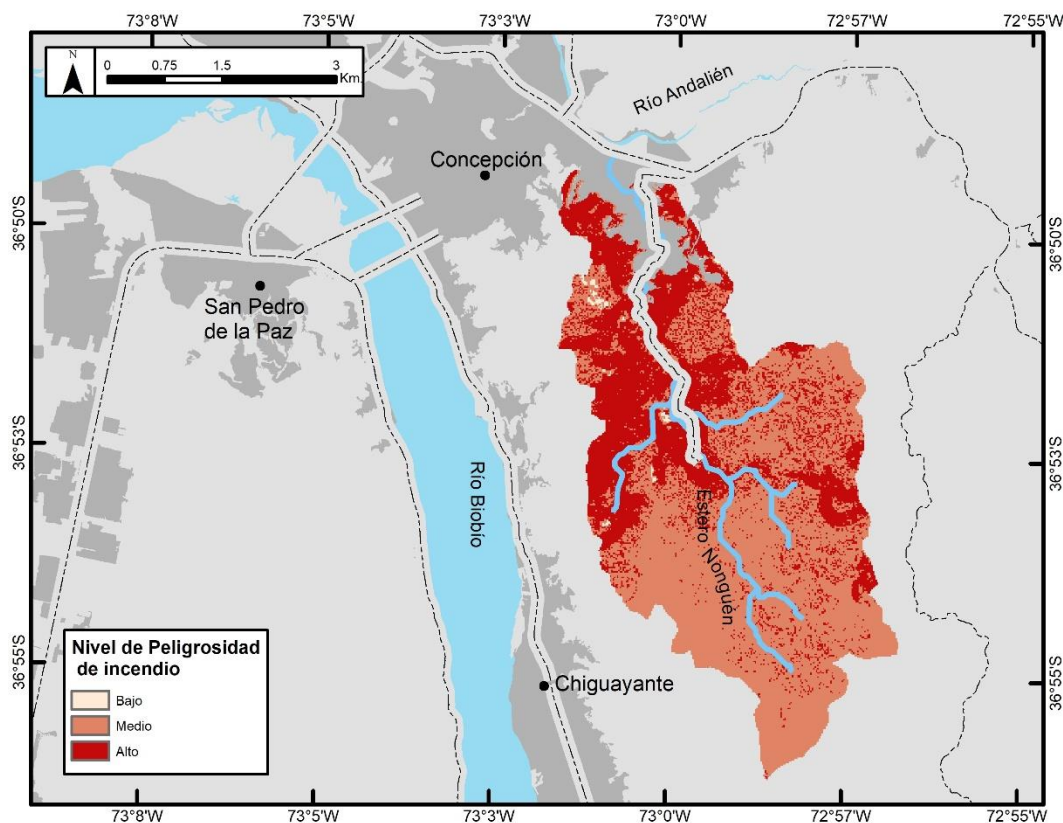
Los resultados finales de la amenaza de incendio forestal para la cuenca del estero Nonguén (figura 16), mostraron que la categoría de amenaza media correspondió a la categoría de mayor extensión con 3066 ha (60%); principalmente vinculada a presencia de bosque nativo perteneciente al Parque Nacional Nonguén. En sectores que limitan con la zona urbana, caseríos y parcelas, la amenaza de incendio es alta en una superficie de 1848 ha (36%), asociado a la cercanía de las plantaciones forestales. Finalmente, 224 (4%) ha correspondieron a la amenaza de incendio en nivel bajo, las cuales se encontraron concentrados hacia el interior del área urbana (Figura 17). Uno de los factores de mayor incidencia en el nivel de peligro de incendios forestales, correspondió al tipo de vegetación existente dentro de la cuenca, como, plantaciones forestales y matorrales que ocupa un 59% de la superficie de la cuenca, el cual coincide en un 72% con los incendios forestales registrados de los últimos 5 años.

Figura 16. Amenaza de incendio para la cuenca del estero Nonguén año 2017



Fuente: Elaboración propia

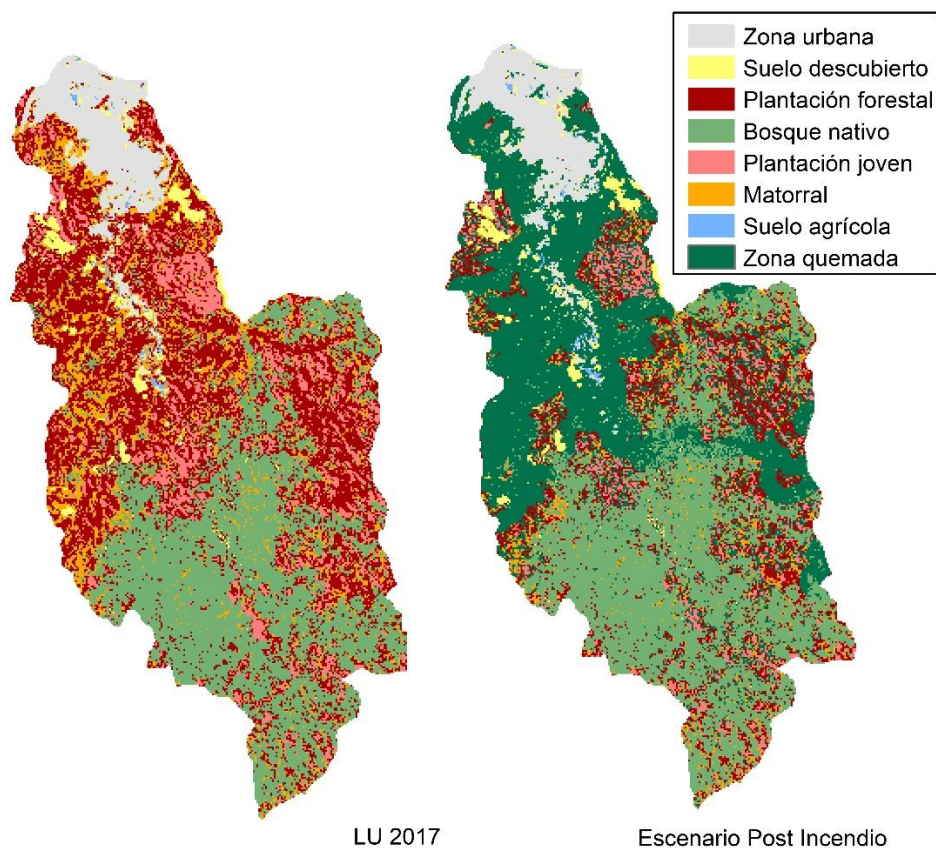
Figura 17. Cartografía de amenaza de incendio forestal para la cuenca del estero Nonguén



Fuente: Elaboración propia

Para la simulación de la crecida frente a un incendio forestal se utilizó el nivel de amenaza alto, que implicó una afectación del 36% de la superficie de la cuenca en sectores aledaños a la zona urbana y caseríos rurales debido a la presencia de plantaciones forestales y matorrales. Posteriormente el nivel de amenaza alto fue integrado al uso de suelo del año 2017; por lo que la cuenca paso a tener un 36% de su superficie como zona quemada, generando un nuevo escenario de suelo, lo que modifica la capacidad de infiltración y escorrentía de la cuenca. Los parámetros hidrológicos se mantuvieron para la simulación, a excepción del valor de curva número ya que se modificó la cobertura de suelo inicial entregando un valor CN de 82, que respecto al inicial es más cercano a 100 por lo que la superficie de la cuenca se volvió teóricamente más impermeable.

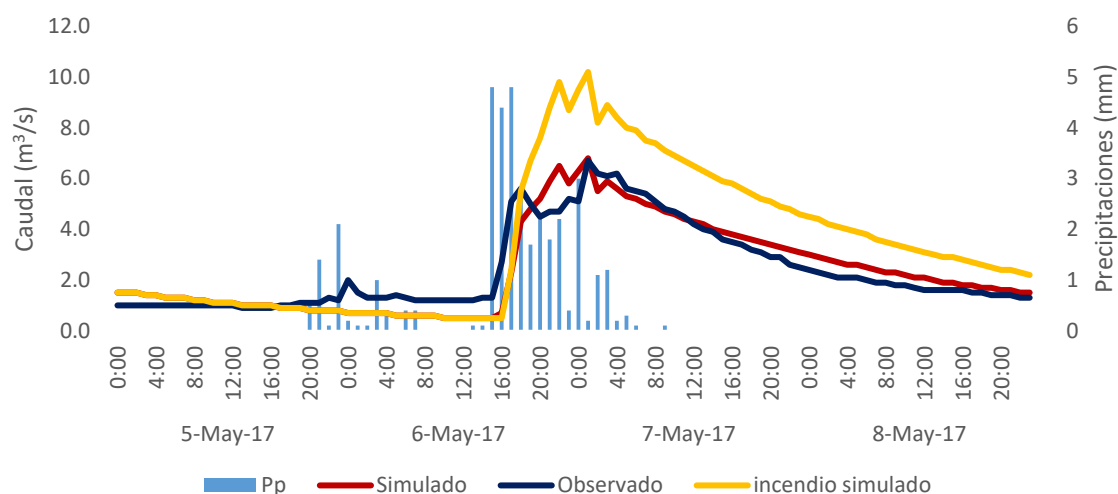
Figura 18. Escenario de cobertura de suelo post-incendio forestal



Fuente: Elaboración Propia

Se seleccionó la crecida del 5-05-2017, ya que fue la que presentó una mejor función objetivo ($NSE=0.85$), para ser simulada con el nuevo escenario. Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo HEC-HMS en el pronóstico de una crecida frente a un escenario post-incendio forestal mostró un incremento en los volúmenes del peak de descarga, en comparación al escenario inicial creado a partir del uso de suelo del año 2017. En la serie de datos obtenidos se estimó que el volumen de descarga aumentó más del 44% respecto al inicial, y de la misma manera el “peak Flow” aumentó en un 55% alcanzando los $10.2\text{m}^3/\text{s}$, respectivamente.

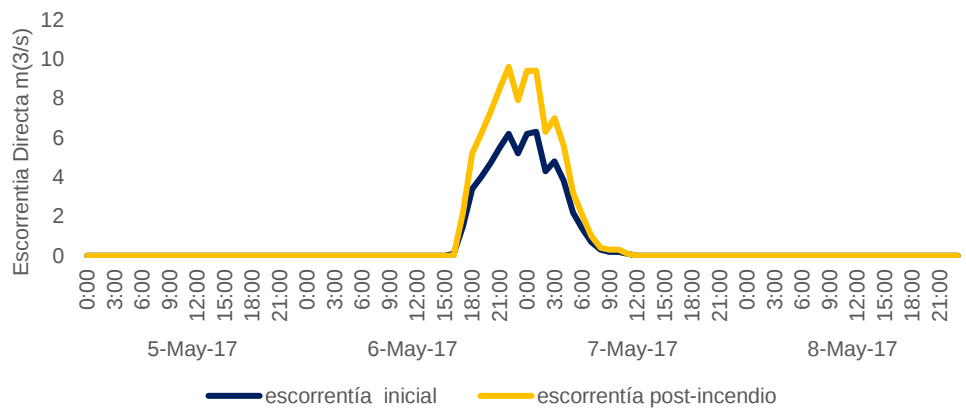
Figura 19. Crecida simulada para Escenario post-incendio forestal.



Fuente: Elaboración propia

Lo anterior deja en evidencia los cambios biofísicos espaciales que puede sufrir la cuenca frente a eventos extremos como son los incendios forestales, y como pueden alterar la respuesta hidrológica. En la figura 20 se puede observar como la escorrentía directa para un mismo evento se comportó de manera distinta al existir condiciones de suelo diferentes. La escorrentía directa en condiciones de un suelo post-incendio forestal se vió alterada considerablemente en comparación a la condición de uso de suelo del año 2017. Se pudo observar un aumento de 4.37mm a 6.6mm, lo que se puede traducir en una reducción en la permeabilidad de la superficie quemada y una disminución de la capacidad de infiltración del suelo. Esto generó una mayor precipitación efectiva lo que repercutió en la crecida sustancialmente aumentando el volumen y el “peak” de descarga.

Figura 20. Gráfico de comparación de escorrentía directa en condiciones normales de suelo y post-incendio forestal



Fuente: Elaboración propio

6. Discusión

6.1. Beneficios de la plataforma *Google Earth Engine* para la clasificación de imágenes satelitales.

La primera contribución de este estudio, es la utilización de la plataforma *Google Earth Engine* (GEE) para la detección de los cambios de uso de suelo en la cuenca del estero Nonguén. El GEE permite un análisis de cobertura de suelo a alta velocidad de manera online (Huang, y *et al.*, 2017; Zurqani *et al.*, 2018) disminuyendo la utilización de los recursos propios del *hardware* lo que antes era un problema, ya que consumía una gran cantidad de tiempo y capacidad de almacenamiento. El acceso fácil y gratuito del GEE a la colección de imágenes satelitales principalmente la colección Landsat, la cual se puede visualizar en el explorador conservando su referencia espacial y metadatos originales, es una gran ventaja para cartografiar a gran escala y en largas series de tiempo, detectando procesos de deforestación y expansión urbana que afectan negativamente a la cobertura natural del suelo de las cuencas hidrográficas (Sidhu *et al.*, 2018).

Una característica simple pero esencial dentro de la plataforma son las “*Data Tables*” que se pueden visualizar en GEE. Estas *Data tables* se pueden utilizar para importar y exportar datos *Keyhole Markup Language* (KML) y *Keyhole Markup Language Zipped* (KMZ) (Sidhu *et al.*, 2018; GEE, 2020). Además, admite una amplia variedad de formatos que pueden ser descargados directamente como archivos .zip o exportados a la plataforma de Google Drive y cambiar en otras plataformas de detección remota y SIG (GEE, 2020). Por otro lado, la plataforma GEE posee una extensa lista de algoritmos clasificadores (RandomForest, CART, SVM, etc.) que dependiendo de los resultados se elige el clasificador con mejor índice de validación. En el caso del presente estudio se utilizó el algoritmo clasificador CART, ya que entregó resultados más satisfactorios en el área de estudio sobre el RandomForest que de acuerdo con la literatura es el mejor clasificador (Huang *et al.*, 2017; Noi Phan, Kuch, & Lehnert, 2020) dentro de la plataforma, por lo que se concluye que el área de estudio es muy pequeña para ese tipo de clasificador.

Las limitantes que se pudieron observar al momento de trabajar en la plataforma son importantes de mencionar, ya que puede afectar el proceso de clasificación. Una de ellas es el número de puntos límite de muestreo que alcanzan los 5000 píxeles (GEE, 2020). Al tener una nube acotada de puntos de entrenamiento disminuye drásticamente el número de clases de cobertura de suelo, obligando al usuario a homogeneizar la clasificación. Otra observación es el peso máximo del script en la plataforma de un total de 512 Kb (GEE, 2020); y que se genera por el límite de puntos de muestreo anteriormente mencionados y el peso de la imagen satelital que se desea clasificar incluyendo los diferentes algoritmos aplicados para mejorar la precisión de la clasificación. Esto impide que el GEE guarde el script en el cual

se está trabajando, mostrando una baja capacidad de almacenamiento de la plataforma online de los proyectos.

6.2. Cambio de uso de suelo en la cuenca del estero Nonguén

La segunda contribución de este estudio, es la detección y cuantificación de los cambios de uso de suelo en la cuenca del estero Nonguén para un periodo de 30 años. Según los resultados del análisis de las coberturas analizadas, no difieren a otros autores en Chile central (Aguayo *et al.*, 2009). En la cuenca del río Andalién, la transformación espacial del paisaje se asocia a una sobreexplotación de las tierras agrícolas a expensas de la tala y quema de la vegetación nativa que abarca gran parte del territorio (Sanhueza & Azocar, 2000). En las zonas montañosas de la cuenca se observó una degradación del 18% producto de la deforestación del bosque nativo siendo remplazado por amplias hectáreas de trigo desde 1900 a 1950 (Jaque, 2008; Rojas, 2015).

Las plantaciones forestales comenzaron un proceso de expansión a partir de 1931 a través de la promulgación de un cuerpo legal que promueve la reforestación del territorio con plantaciones exóticas principalmente *Pino Radiata* manifestando el interés del Estado para el control de la erosión ocasionada por los cultivos agrícolas a inicio de siglo XX (Cisterna *et al.*, 1999). Sin embargo, no fue hasta 1974, año en el que se promulgó el decreto Ley 701, que subsidia la forestación y el manejo de las plantaciones, que se impulsó un desarrollo forestal a nivel nacional (Aguayo *et al.*, 2009). Según Millán & Carrasco (1993) la tasa de forestación anual se incrementó desde 48 mil hectáreas en el periodo 1965 -1974 a 83 mil entre 1975 y 1991.

Los cambios más importantes observados en la cuenca se deben al aumento de plantación forestal, hasta ser la cobertura dominante en el año 2017 ocupando el 34% de la superficie. Por el contrario, el bosque nativo fue la cobertura más degradada con pérdidas acumuladas que llegaron a las 1300 ha en el periodo 1987-2017. Lo anterior tiene sentido con respecto al estado actual de la cuenca del río Andalién, ya que según Martínez-Retureta *et al.* (2020), desde 1986 al 2011 las plantaciones forestales tuvieron una tendencia positiva con un aumento del 55%, y el bosque nativo junto a los matorrales presentó un decrecimiento del 35%, siendo las plantaciones forestales una de las principales causas de destrucción de estos ecosistemas. En efecto, Echeverría *et al.* (2006) calculó una tasa de deforestación de 4,5% anual para el periodo 1975-2000 en la Cordillera de la Costa, la cual fue contrastada con las pérdidas de bosque nativo estimadas por CONAF entre 1994 y 1998 con una tasa resultante de deforestación de un 0,3% anual para la región del Biobío. Este análisis coincide con la declaración de Reserva Natural Nonguén en el año 2009 localizada en la parte media y cabecera de la cuenca, con el

fin de proteger los últimos vestigios del ecosistema mediterráneo templado costero de la zona, ahora declarada Parque Nacional en mayo del año 2020 (CONAF,2020).

Finalmente, durante el período de análisis se observó un aumento del área urbana de 250 hectáreas respecto al año 1987, el cual se produjo sobre terrenos agrícolas y suelo descubiertos en las llanuras fluviales del estero Nonguén. Esto tiene relación con el crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre las llanuras del río Bíobío y el río Andalién, del año 1943 al 2011 el crecimiento del suelo urbano fue de 1865 hectáreas, por lo que las poblaciones construidas están en zonas en constante riesgo de inundación (Rojas et al., 2017).

6.3. Respuesta del modelo hidrológico HEC-HMS

HEC-HMS es uno de los modelos más utilizados para la simulación de crecidas en cuencas hidrográficas (Zhang *et al.*, 2013; Zope *et al.*, 2016; Younis & Ammar, 2017). Sin embargo, el software tiene sus limitaciones, en primer lugar, en la escala de trabajo. El modelo hidrológico HEC-HMS no puede calibrar y simular cuencas que posean una superficie menor a 20 Km² (USACE, 2018), siendo un impedimento a la hora de estudiar inundaciones y crecidas en microcuencas urbanas. De acuerdo a los resultados entregados por el modelo hidrológico de la cuenca del estero Nonguén, este mostró complicaciones a la hora de subdividir la cuenca a través de la extensión en Arcgis HEC-GeoHMS, ya que en las subcuencas resultantes, las superficies variaban entre 1 a 15 Km² siendo inconsistente para el programa, por lo que se optó por modelar la cuenca sin subdivisiones, lo que entregó resultados favorables.

Por otro lado, la disponibilidad de los datos y la resolución es un factor determinante al momento de modelar (López, *et al.*, 2012; Estrada, 2012). La resolución temporal y espacial de los datos de caudal y precipitaciones deben estar disponibles para la misma fecha de la crecida a simular, ya que al momento de calibrar los parámetros es un factor decisivo para el éxito. Otra observación es la escala temporal de los datos, cada cuanto tiempo el instrumento realiza la medición de caudal y precipitación de manera sincronizada ya sea cada 20 minutos o una hora para disminuir el desfase entre ellas, para mejorar los parámetros de calibración y así disminuir el margen de error entre la crecida simulada y la calibrada, ya que así se acerca a los valores de caudal reales (López *et al.*, 2012).

A pesar de las limitantes observadas en el modelo, los resultados que mostró el modelo hidrológico HEC-HMS fueron satisfactorios siendo la cuarta contribución y el enfoque principal de este estudio. El modelo en la cuenca del estero Nonguén, la calibración y validación de las crecidas seleccionadas en el periodo en estudio, validó la caracterización fisiográfica e hidrológica de la cuenca ya que permitió obtener los parámetros hidrológicos necesarios para realizar la optimización automática de estos. La

calibración de las crecidas y sus parámetros fueron validados a través del índice de NSE, el más utilizado en los modelos hidrológicos (Castro, 2017). A nivel general, el NSE de las crecidas calibradas fue bastante satisfactorio ya que, varió entre un 0,7 y 0,8 lo que se traduce en un ajuste de los parámetros bastante aceptable en la simulación de las crecidas. Finalmente, de acuerdo con el análisis de sensibilidad aplicado a los parámetros, se pudo concluir que el método SCS del número de curva que incluye los parámetros de número de curva CN y las pérdidas iniciales son los parámetros más sensibles en la calibración automática, ya que su variación genera grandes fluctuaciones en los caudales simulados del hidrograma lo cual coincide con lo señalado por diferentes autores en el estudio de simulación de crecidas. Este método fue desarrollado por el *United State Departament of Agriculture* (USDA), el cual estima las precipitaciones retenidas y el exceso que se convierte en escorrentía superficial de acuerdo con el tipo de suelo predominante en la cuenca (Soil Conservation Service, 1972). Cabe señalar que los parámetros CN utilizados en el modelo se recopilaron bibliográficamente por lo que la cobertura de plantación forestal joven posee los valores menos cercanos a la realidad ya que la USDA no tiene información al respecto (Martínez-Retureta *et al.*, 2020).

Por otro lado, la modelación hidrológica puede ser utilizada como herramienta para simular crecidas e inundaciones para escenarios futuros de cobertura de suelos con el fin de estimar los cambios en la escorrentía superficial (Morrison & Kolden, 2015; Shroder, 2015). Los resultados del objetivo tres mostraron como responde la escorrentía superficial y la percolación de una cuenca ante un evento extremo en este caso para un incendio forestal. Se simuló una crecida para el peor de los casos de incendio forestal que abarcó un área quemada del 36% de la cuenca. La respuesta hidrológica cambió drásticamente, ya que el volumen de la escorrentía superficial aumentó respecto al inicial, lo que repercutió en el caudal punta máximo de la crecida aportando un 55% más de agua, asimilándose a los eventos de incendio forestal ocurridos en California, Estados Unidos, en el año 2014 donde se quemaron aproximadamente 4 km², y que al año siguiente una intensa lluvia en la zona generó una crecida en 3 minutos después de la primera lluvia (USGS, 2018). Esto generó un flujo de escombros a la salida de la cuenca que afectó a las poblaciones aledañas. Finalmente, la relevancia de tener datos reales de caudal, precipitaciones y espaciales de la cuenca post a un evento de incendio forestal son necesarios para validar los caudales y escorrentía superficial simulados, ya que no solo mejora la capacidad predictiva y exactitud del modelo hidrológico, sino que también permite generar escenarios futuros de incendio forestal respaldados con datos reales y así generar medidas preventivas a nivel de cuenca que disminuya la frecuencia de este tipo de eventos

Los resultados de la investigación pueden ser considerados como insumo para la elaboración de modelos hidráulicos de inundaciones, en los cuales se puedan generar las zonas inundables para

distintos períodos de retorno (Carrera *et al.*, 2013). Ambos modelos son de gran importancia a la hora de gestionar y planificar el territorio de una cuenca con un historial de inundaciones, ya que entregan una aproximación de las zonas de inundables, ayudan generar planes territoriales integrados enfocados a la protección y recuperación de la cobertura vegetal de la cuenca y a los ecosistemas ribereños, como los humedales, que entregan un servicio ecosistémico de protección en el control de las inundaciones (Neale & Weir, 2015; Carrera *et al.*, 2013)

En Chile, la protección y/o restauración de la cobertura vegetal de las cuencas hidrográficas no está dentro de las prioridades, y se debe principalmente a los incentivos que ofrece el mercado forestal y a la compensación monetaria tras la transformación de la cobertura de suelo en zona para la plantación de monocultivos exóticos (Martínez-Retureta *et al.*, 2020). Por esta razón, los instrumentos de planificación territorial vinculados al manejo y gestión integrada cuencas hidrográficas y recurso hídrico deben ser incluidos como instrumentos normativos ya que facilitan la toma de decisiones para el control y manejo de crecidas, restringiendo o bien disminuir la superficie de tala y cosecha de plantaciones forestales presentes en la cuenca y/o cambiando el método de cultivo de las plantaciones forestales incluyendo especies nativas dentro de las parcelas para el control de escorrentía (Dourojeanni & Chevaleraud, 2010).

También a través de políticas duras de protección ambiental, como es la Ley N° 21.202 que “Modifica diversos cuerpos legales con el objetivo de proteger los humedales urbanos”, puede ser una oportunidad para implementar medidas de manejo y gestión de cuenca y realizar modificaciones en el plan regulador comunal y que cumplan una doble función: proteger los humedales, y zonas ribereñas de ríos en zonas urbanas, y también a la protección y restauración de las llanuras fluviales con el objeto de aumentar la resiliencia y la preparación frente a eventos de inundación y disminuir el factor de riesgo de la población (OMM, 2009).

7. Conclusiones

De acuerdo al análisis de cambio de *LULC*, se observó una clara disminución del bosque nativo en 1300 ha en el periodo 1987 – 2017; el cual fue remplazado por extensas plantaciones de monocultivo, siendo ahora la cobertura dominante en la cuenca. Finalmente, la urbanización tuvo un paulatino aumento ocupando las llanuras fluviales del estero Nonguén desde 1998 con la construcción de viviendas.

La aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS fue capaz de simular satisfactoriamente los caudales de crecidas menores en la cuenca del estero Nonguén, para los 4 eventos registrados entre los años 2016 y 2017. El trabajo de caracterización física e hidrológica de la cuenca fue importante para la calibración y simulación de las crecidas para el ajuste ideal de los parámetros hidrológicos considerados. Según el ajuste realizado en la calibración, las crecidas dieron un índice de validación *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE) que varió entre 0.73 y 0.85 que corresponde a una buena calibración. Para el evento del 20 de julio de 2016 el caudal pico de descarga observado fue de 12.1 m³/s similar al pico simulado de 16.1 m³/s, y la crecida del 5 de mayo del 2017 observada fue de 6.4 m³/s igual al simulado. Por último, del total de precipitación caída en la cuenca, el 15% generó escorrentía directa y el 85% se atribuye a abstracciones, condición dada por la presencia plantaciones forestales, bosque nativo y otras especies arbustivas que corresponden al 90% de la superficie de la cuenca.

Los resultados observados en la simulación de una crecida ante un evento de incendio forestal, para este tipo de evento u otras modificaciones de alto impacto y sobre la cobertura de suelo altera los parámetros hidrológicos de la cuenca principalmente la escorrentía superficial. Esta aumenta su volumen en un 44% respecto al inicial debido a los cambios en el ciclo hidrológico, la cual provoca escurrimiento hacia el cauce aumentado así la descarga máxima del estero alcanzando los 10.2m³/s lo que puede generar un desbordamiento del estero afectando a las poblaciones aledañas a este.

La utilización de los modelos hidrológicos, en este caso el HEC-HMS, para la simulación de crecidas es una herramienta útil para la predicción de caudales ante eventos de intensas precipitaciones y o simulaciones de modificaciones de cobertura de suelo, ya que entrega una noción cercana a cómo responde la hidrología de la cuenca, lo cual ofrece un grado de confianza para la toma de decisiones,

ya sea en la planificación territorial para el manejo integrado del uso de suelo y/a la protección de humedales y zonas de riveras que son capaces de soportar crecidas e inundaciones en situaciones de emergencia.

8. Bibliografía

- Abdulkareem, J., Sulaiman, W., Pradhan, B., & Jamil, N. (2018). Relationship between disgn flood and land use land cover (LULC) changes in a tropical complex catchment. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Adasme Díaz, C. (2018). *Evaluación de amenaza de incendio forestal en el interfaz urbano-forestal de la comuna de Chiguayante*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso de suelo en el centro de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista de Historia Natural*, 361-374.
- Aguayo, M., Sther, A., & Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios . *Revista de Geografía Norte Grande*, 197-214.
- Alcaraz, F. (2012). *El factor fuego. Ciudad de Murcia: Geobotánica*. Murcia.
- Avila, M. (2002). *"Modelos digitales de elevación hidrológicamente constantes para la cuenca amazonica" Tesis doctoral* . Minas Gerats, Brasil : Universidade Federal de Vicosa.
- Banfield, C., Braun , A., Castillo, A., & Vogt, J. (2018). Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile. *Catena*, 77-84.
- Bateman, A. (2007). *Hidrologia basica y aplicada*. GITS Grupo de invenstigacion en transporte de sedimentos .
- Bendient, P., & Huber, W. (2002). *Hydrology and floodplain analysis*. Prentice Hall.
- Bohle, G. (2009 de Enero de 2009). *Recopilación de información para la modelación distribuida de la cuenca del río Itata utilizando SWAT*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C., & Olshen, R. (1984). *Clasification and regression trees*. Boca, Raton, London, New York, Washington D.C.: Chapman & Hall/CRC.
- Bustamante Ortega, R. S. (2008). *Calibración y validación del modelo HEC-HMS, en la cuenca de Huenchún, Región Metropolitana*. Talca: Universidad de Talca .
- Carrera, J., Méndez, W., & Rivas, L. (2013). Modelaje hidrológico de escenarios para eventos de inundaciones en la planicie de desborde del río Patanemo, estado Carabobo, Venezuela. *Scielo*.
- Carrera, J., Méndez, W., & Rivas, L. (2013). Modelaje hidrológico de escenarios para eventos de inundaciones en la planicie de desborde del río Patanemo, estado Carabobo, Venezuela. *Scielo*.
- Castro, L. (2017). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo*. Santiago: Universidad de Talca.

- Choi, W., & Deal, B. (2008). Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River Basin (USA). *Journal of Environmental Management*, 1119-1130.
- Chotin, P. (1979). *Geología de la Provincia de Concepción Área de Tomé: 1 :50.000*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada McGraw-Hill interamericana S.A.*. Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Barcelona : Editorial Ariel.
- CIREN. (1999). *Estudio agrologico Región del Biobío: Descripción de suelos* . Santiago .
- Cisterna, M., Martínez, P., Oyarzún, C., & Debels, P. (1999). Caracterización del proceso de reemplazo de vegetación nativa por plantaciones forestales en una cuenca lacustre de la cordillera de Nahuelbuta, VIII, Chile. *Revista Chilena de Historia natural*, 541-556.
- CONAF. (2020). *Parques Nacionales*. Concepción.
- CONAF. (s.f.). *Estadística histórica de incendio forestales en Chile: Ocurrencia y daño por comuna 1985-2016 (comunidades críticas)*.
- Conde, C., & Baena, J. (2004). SIG y paleohidrología: Reconstrucción del modelo hidrológico en el yacimiento paleolítico de Camino de Salmedina. *CuPAUAM_ Cuadernos de Prehistoria y Arqueología* , 9-25.
- Correa , F., & Salazar, C. (2014). Caracterización físicoquímica del agua del estero Nonguén y su confluencia con el río Andalién, región del Biobío. Variación en relación a los distintos usos de suelo en su cuenca. *Sustainability*, 33-46.
- Dourojeanni, A., & Chevaleraud, Y. (2010). La mesa del Agua y la Gestión del Cuenca en Chile. *Centro Atacama Agua y Energía*.
- Duque, P., Patiño, D., & López, X. (2019). Evaluation of the Hydrological Modeling System HEC-HMS for the Hydrological Simulation of a tropical Andean Micro-basin. *Scielo*.
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests . *Biological Conservation* , 481-494.
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological processes*, 507-515.
- Ecosistemas, A. d. (2017). *Territorio Nonguén*.
- Estrada, V. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba . *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* , 94-105.
- Etcheberria, P. (2002). Cartografía de peligro de incendios forestales mediante sistemas de información geográfica y modelo de propagación. *XIV Congreso internacional de ingeniería gráfica*. Santander, España.

- Faridatul, M., & Wu, B. (2018). Automatic clasification of major urban land covers based on novel spectral indices . *International Journal of Geo-Information* 7.
- Fernández Soto, E., & Peña Cortés, F. (2016). Aplicación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido en dos cuencas costeras de la Región de La Araucanía (Chile). *Estudios Geográficos*, 35-56.
- ferrér, M., Rodríguez, J., & Estrela, T. (1995). Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Igeniería del Agua*, 43-58.
- Flores Montoya, I. (2018). *Generación de hidrogramas de crecidas mediante simulación estocástica multivariada de lluvia y modelación hidrológica distribuida: aplicación a seguridad de presas*. Madrid: Univerisdad Politecnica de Madrid.
- GEE. (29 de Diciembre de 2020). *Introduction to JavaScript for Earth Engine*. Obtenido de Introduction to JavaScript for Earth Engine: https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/tutorial_js_01
- Gilroy, K., & McCuen, R. (2012). A nonstationary flood frequency analysis method to adjust for future climate change and urbanization . *Journal of Hidrology*, 40-48.
- Hidalgo, R., Mattos, C., & Arenas, F. (2009). *Chile:del país urbano al país metropolitano*. Santiago: Instituto de Geografía.
- Horler, D., & Ahern, F. (1986). Forestry information content of thematic mapper data . *Internation Journal of Remote Sensing* 7, 405-428.
- Horton, R. (1933). The role of infiltration in the hidrologic cycle. *Transactions of the maerican Geophysical Union* 14, 446-460.
- Huang, H., Chen, Y., Clinton, N., Wang, J., Wang, X., Liu, C., . . . Zhu, Z. (2017). Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing of Enviroment*, 166-176.
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 295-309.
- Huete, A., Miura, K., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysucal performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195-213.
- Ingol, E. (2016). *Modelamiento Hidrológico Geoespacial Usando HEC-GeoHMS: Aplicación en la cuenca del Río Chilca*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Jacobson, C. R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Enviromemental Managment*, 1438-1448.
- Jaque, E. (2008). Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile. *Revista Geográfica* , 97-116.
- Jaque, E., Castillo, C., Ojeada, C., & Díaz, P. (2019). Educational vulnerability to wild fires in the Metropolitan Area of Conception. Case study: Penco, Chile. *Estudios socioterritoriales Revista de Geografía*.
- Keller, E., & Blodgett, R. (2007). *Riesgos naturales: Procesos de la tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid, España: Pearson Prentice hall.

- Knebl, M., Yang, Z., Hutchinson, K., & Maidmnet, D. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio river basin summer 2002 sotrm event. *Journal of Enviromental Managment*, 325-336.
- Lacher, I., Ahmadisharaf, E., Fergus, C., Akre, T., Mshea, J., Benham, B., & Kline, K. (2019). Scale-dependent impacts of urban and agricultural land use on nutrents sediment, and runoff. *Science of the Total Enviromental* , 611-622.
- Lambin, E., & Geist, H. (2006). *Land-Use and Land-Cover Change*. Berlín.
- Lewis, D., Singer, M., & Tate, K. (2000). Applicability of SCS Curve Number Method for a California Oak Woodlands Watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Li, S., & Chen, X. (2014). A new bare-soil index for rapid mapping developing areas using landsat 8 data. *Remote Sensing and spatial information Sciences* 4, 139-144.
- Llorente, M., Díez-Herrero, A., & Laín, I. (2009). Aplicaciones de los SIG al análisis i gestión del riesgo de inundaciones; avances recientes. *Cuadernos de la Sociedad Española de Clencias Forestales*, 29-37.
- López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro , J., & Gimena, F. (2012). Características del modelo Hec-Hms en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cincio avenidas significativas. *Obras y proyectos*, 15-30.
- Mahmoud, S. (2014). Ivenstigation of rainfall-runoff modeling for Egypt by using remote sensing and GIS integration. *Cantena* , 111-121.
- Martínez de Azagra Paredes, A. (2006). *Método de los coeficientes de escorrentía*. oasification.com.
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Sther, A., Sauvage, S., Echeverria, C., & Sánchez, J. (2020). Effect of land use/cover change on the hidrological response of a southern center basin of Chile . *Water*, 2-21.
- Maza, J., Fernández, P., Vargas, A., Fornero, I., Trípodí, D., Yañez, D., & Nuñez, M. (1995). Estudios hidrologicos e hidraulicos para el ordenamiento territorial de una Cuenca. *Ingeniería del Agua* , 31-44.
- McFeeters, S. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open features. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1425-1432.
- Millan, J., & Carrasco, P. (1993). *La forestación en la VIII Región. Serie EULA Elementos cognoscitios sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre el ordenamiento agroforestal*. Concepción, Chile: Editorial Universitaria.
- Miller, S., Mehaffey, H., Mehaffey, M., Hernandez, M., Miller, R., Goodrich, D., . . . Miller, W. (2002). Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. *Journal of the american water resources association* , 915-929.
- Mölders, N. (2012). *Land-Use and Land.Cover Changes: Impact on Climate and Air Quality*. Fairbanks: Editorial Asvisory Board.
- Momcilo, M., Angel, J., Yang, L., & Hejazi, M. (2007). Changing estimates of design precipitation in Northeast Illinois: Comparison between different source and sensivity analysis. *Journal of Hydrology*, 211-222.

- Moreno, J., & Salazar, J. (2008). Generación de series sintéticas de caudales usando un Modelo Matalas con medias condicionadas. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 349-357.
- Morrison, K., & Kolden, C. (2015). Modeling the impacts of Wildfire on runoff and pollutant transport from coastal watersheds to the nearshore environment. *Journal of Environmental Management*, 113-123.
- Murillo, M. (2010). *El escurrimiento superficial*. La Paz: Ministerio de Desarrollo Rural .
- Neale, T., & Weir, J. (2015). Navigating scientific uncertainty in wildfire and flood risk mitigation: A qualitative review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 255-265.
- Noi Phan, T., Kuch, V., & Lehnert, L. (2020). Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier-The role of Image Composition. *Remote Sensing*.
- Okonski, B. (2007). Hydrological Response to Land Use Change in Central European Lowland forest Catchment. *Journal Environmental Engineering Landscape*, 3-13.
- Ollero, A. (1997). *Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico un planteamiento didáctico*. Vitoria Gasteiz: Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología. Universidad del País Vasco .
- OMM. (2009). *Gestión integrada de crecidas*. Organización Meteorológica Mundial.
- Oyarzún, C., Frene, C., Lacrampe, G., Huber, A., & Hervé, P. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal . *Bosque* , 10-19.
- Pacheco Moya , R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas Montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 94-105.
- Pascual Aguilar, J., & Díaz Martín, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelación hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Madrid: Instituto IMDEA AGUA.
- Placencia Bastía, J. (2018). *Efectos del cambio de cobertura y uso de suelo sobre la escasez de los recursos hídricos superficiales de cuenca del Río Lonquén, Región del Biobío-Chile*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Posavec, K., Bacani, A., & Nakic, Z. (2006). A visual basic spreadsheet macro for recession curve analysis . *Ground Water*.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A., & Kerr, Y. (1994). Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sens Environ* 48, 119-126.
- Resumen.cl. (20 de Febrero de 2020). *Resumen.cl*. Obtenido de Resumen.cl:
<https://resumen.cl/articulos/puchacay-de-barrio-historico-de-concepcion-a-zona-de-sacrificio-inmobiliario>
- Rodríguez, F. (2017). Dynamic simulation of flooding a critical state of maximum runoff, under five return periods, in La Virgen stream in the San José de Miranda Municipality. *UIS Ingenierías*.
- Rojas, O. (2009). *Evaluación del riesgo de inundación fluvial en el curso inferior de la cuenca del río Carampangue*. Concepción: Universidad de Concepción.

- Rojas, O. (2015). *Cambios ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Rojas, O., Mardones, M., Rojas, C., Martinez, C., & Flores, L. (2017). Urban Growth and Flood Disasters in the Coastal River Basin of south. *Sustainability*.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D., Freden, S., Mercanti, E., & Becker, M. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium-Volumen I: Technical Presentations*, Washington, D.C.
- Saghafian, B., & Farazjoo, H. (2008). Flood Intensification due to Changes in Land Use. *Water Resour Manage*, 1051-1067.
- Saghafian, B., Farazjoo, H., Bozorgy, B., & Yazdandoost, F. (2008). Flood intensification due to change in land use. *Water Resources Management*, 50-62.
- Sanhueza, R., & Azocar, G. (2000). Transformaciones ambientales provocadas por los cambios económicos de la segunda mitad del siglo XIX; provincia de Concepción. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 181-194.
- Sanyal, J., Densmore, A., & Carbonneau, P. (2014). Analysing the effect of land use/cover changes at sub-catchment levels on downstream flood peaks: A semi-distributed modelling approach with sparse data. *Catena*, 28-40.
- Sharma, S., & Anjaeyulu, D. (1993). Application of remote sensing and GIS in water resource management. *International Journal of Remote Sensing*, 3209-3220.
- Sharma, S., & Singh, S. (1995). Satellite remote sensing for soil erosion modeling the ANSWER model. *International journal of remote sensing*, 259-272.
- Shroder, J. (2015). *Wildfire Hazards, Risk, and Disasters*. Omaha.
- Sidhu, N., Pebesma, E., & Camara, G. (2018). Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. *European Journal of Remote Sensing*.
- Sivakumar, M. (2007). Interactions between climate and desertification. *Agric For Meteorol*, 143-155.
- Soil Conservation Service. (1972). *SCS National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*. Washington D.C.
- Song, W.-z., Jiang, Y.-z., Lei, X.-h., Shu, J. D.-c., & Wang, H. (2015). Annual runoff and flood regime trend analysis and the relation with reservoirs in the Sanchahe River Basin, China. *Quaternary International*, 197-206.
- Stehr, A., Debels, P., Arumí, J., Romero, F., & Alcayaga, H. (2009). Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Modis imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal*, 1053-1067.
- Stehr, A., Debels, P., Arumí, J., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). Modeling the hydrological response to climate change: experiences from two south-central Chilean watersheds. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.

- Teillet, P., Guindon, B., & Goodenough, D. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. . *Canadian Journal of Remote Sensing* 8, 84-106.
- USACE. (2018). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual*. Estados Unidos : USACE.
- USDA. (1986). *Urban Hidrology for small Watersheds*. Natural Resources Conservation Service.
- USGS. (10 de mayo de 2018). *Post-Fire Flooding and Debris Flow*. Obtenido de Post-Fire Flooding and Debris Flow: https://www.usgs.gov/centers/ca-water/science/post-fire-flooding-and-debris-flow?qt-science_center_objects=3#qt-science_center_objects
- Weber, J., Vestena, L., Stehli, P., & Jorquera, E. (2013). *Modelación hidrológica distribuida de la cuenca del río Caeté, SC, Brasil*. San Juan, Argentina: XXIV Concegreso nacional del Agua-CONAGUA 2013.
- Young, N., Anderson, R., Chignell, S., Vorster, A., Lawrence, R., & Evangelista, H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology* 98, 920-932.
- Younis, S. Z., & Ammar, A. (2017). Quantification of impact of change in land use-land cover on hydrology in the upper Indus Basin, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*.
- Zhang, H., Wang, Y., Li, D., & Wang, X. (2013). The effect of watershed scale on HEC_HMS calibrates parameters: a case study in the CLeare Creek watershed in IOWA, US. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2735-2745.
- Zope, P., Eldho, T., & Jothiprakash, V. (2015). Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India. *Nat Hazards*, 887-908.
- Zope, P., Eldho, T., & Jothiprakash, V. (2016). impacts of land use-land cover change and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. *Catena*, 142-154.
- Zubair Younis, S., & Ammar, A. (2017). Quantification of impact change in land use-land cover on Hydrology in the upper Indus Basin, Pakistan . *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* .
- Zurqani, H., Post, C., Mikhailova, E., Schlautam, M., & Sharp, J. (2018). Geospatial analysis of land use change in the Savannah River Basin using Google Earth Engine. *Int. J. Appl Earth Obs Geoinformation* , 175-185.