

SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA PARTE BAJA DEL RÍO BIOBÍO*Oriel Pavez V.¹, Diego Caamaño A.², Mauricio Villagrán V.³***RESUMEN.**

Durante la última década se ha observado un aumento significativo de la cobertura vegetal en la parte baja del río Biobío, Chile. Esta reciente colonización coincide con un período de sequías y la operación de grandes centrales hidroeléctricas construidas en las décadas recientes. A raíz de esto se desarrolló una investigación para cuantificar el crecimiento de la vegetación y la consecuente variación en la hidrodinámica del sistema. Se utilizaron los resultados combinados de dos modelos numéricos bidimensionales, uno hidrodinámico y uno de vegetación. Las condiciones hidráulicas se simularon para magnitudes asociadas a años de retorno menor a 2; iguales a 2, 5, 10, 25, 50, 100; y mayor a 100 años, utilizando para ello el modelo FASTMECH de la plataforma IRIC. Los resultados hidráulicos (i.e. esfuerzo de corte, profundidad del agua y tiempos secos/mojados) alimentan el modelo de vegetación "CASiMiR" que simula la evolución espacio-temporal de los arbustos, árboles y pioneros que se encuentran en la zona de estudio.

El concepto general del modelo de vegetación es que una comunidad vegetacional será reciclada si la magnitud de un parámetro físico es mayor que el valor umbral para la sustentabilidad de dicha especie; de lo contrario, la sucesión tendrá lugar hacia la etapa de maduración.

La precisión global entre la vegetación observada y simulada fue de un 78%, 42% y 53% para el año 1998, 2009 y 2014 respectivamente, se cree que las diferencias se deben principalmente a la escala espacial que en este caso, dadas las dimensiones de la zona de estudio, quedan restringidas por el modelo hidráulico (celdas de 15x15m). Además se debe tener en cuenta que se utilizó un único set de datos batimétricos que condiciona los resultados del flujo, es decir, el lecho se consideró fijo descartando procesos de depositación/erosión en los cálculos del modelo vegetación.

PALABRAS CLAVES: Vegetación Dinámica; Simulación; Río Biobío.

ABSTRACT

During the last decade, there has been a significant increase in vegetation cover in the lower Biobío River, Chile. This recent colonization coincides with a period of drought and the operation of large hydroelectric plants. As a result of this, an investigation was developed to quantify the growth of the vegetation and the achievement of the variation in the hydrodynamics of the system. We used the combined results of two two-dimensional numerical models, one hydrodynamic and one vegetation. The hydraulic conditions were simulated for the magnitudes associated with years of return less than 2; Same as 2, 5, 10, 25, 50, 100; And greater a 100 years, using for the FASTMECH model of the IRIC platform. Hydraulic results (ie shear stress, water depth and wet / dry times) feed on the "CASiMiR" vegetation model that simulates the spatio-temporal evolution of shrubs, trees and pioneers found in the study.

The general concept of the vegetation model is that a plant community was recycled and the magnitude of a physical model is greater than the threshold value for the sustainability of the species; Otherwise, the sequence takes place towards the maturation stage.

The overall accuracy between observed and simulated vegetation was 78%, 42% and 53% for 1998, 2009 and 2014 respectively, it is believed that the differences are mainly due to the spatial scale that in this case, given the dimensions From the study area, the restrictions for the hydraulic model remain (15x15m cells). In addition it should be taken into account that a unique set of bathymetric data was used that conditioned the flow results, that is, the bed was considered to be discharged deposition / erosion processes and calculations of the vegetation model.

KEYWORDS: Dynamic Vegetation; Simulation; Biobio River.

¹ *Opta al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, oapavez@ing.ucsc.cl*

² *Profesor Guía, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, dcaamano@ucsc.cl*

³ *Profesor Informante, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción mvillagran@ucsc.cl*

1. INTRODUCCIÓN.

La interacción entre el flujo en un río y su vegetación ribereña circundante ha generado mucho interés en los últimos años, principalmente debido a sus implicancias ambientales y de manejo (Naiman, R.J., 1997). Las características hidrológicas, hidráulicas y geomorfológicas determinan las condiciones del flujo y consecuentemente la influencia de éste sobre la vegetación y su retroalimentación con el cauce. Por ejemplo, la vegetación presente en el río induce la sedimentación, y aumenta los nutrientes y semillas en el entorno ribereño. De esta manera aumenta la resistencia hidráulica en las áreas vegetadas, frenando y peraltando localmente el flujo con el consecuente aumento de velocidad en aquellas zonas hidráulicamente convergentes. Visto de otra forma la vegetación, que depende de los procesos de colonización, crecimiento y muerte, se comporta como elemento activo en la dinámica ecológica de la zona inundable e interactúa con los procesos fluviales, provocando cambios en la evolución de los patrones de flujo y, en todo el sistema de vegetación ribereño (Robertson and Augspurger, 1999; Hupp, 2000).

Para evaluar el impacto de estas interacciones se crearon hace unas décadas modelos de vegetación que incorporaron diferentes factores tales como la competencia y la tolerancia a la sombra, sin embargo, no consideraban la evolución de las variables hidráulicas e hidrológicas en el tiempo (Pearlstone et al., 1985). Recientemente la aparición de nuevos sensores aerotransportados combinado con la disponibilidad de imágenes satelitales, ofrecen suficiente información para alimentar los modelos de manera que éstos sean capaces de abordar cambios en la vegetación como consecuencia de la modificación de las variables ambientales y las alteraciones hidrológicas (Braatne et al., 2007 y Conesa et al., 2012). Uno de los nuevos modelos es CASiMIR, capaz de simular la distribución de la vegetación a partir de mapas digitales con variables hidráulicas/hidrológicas cambiantes (i.e. frecuencia de inundación, duración de inundación y profundidad de la napa freática). Estas características permiten realizar predicciones en periodos de décadas y en grandes extensiones espaciales, con resultados que consideran análisis anuales en los ecosistemas y permiten evaluar la tendencia de los impactos a través del tiempo (Benjankar, R., Yager, E., Tonina, D., and Merz, N. 2015).

En esta investigación se desarrolló un modelo dinámico de vegetación espacialmente distribuido en la parte baja del río Biobío con el software CASiMiR. Este software simuló la vegetación a partir de parámetros físicos generados por un modelo hidráulico, se utilizaron datos observados en el área de estudio e información dispuesta en la literatura científica. Este informe describe la estructura, el desarrollo y la prueba de un modelo de vegetación en la parte baja del río Biobío.

2. DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO.

El área de modelación corresponde a los últimos 14km del río Biobío y su desembocadura (figura 1). El río Biobío es uno de los principales ríos de Chile, su cuenca cubre una superficie de 24.264 km^2 y su caudal máximo medio mensual es de $2.200 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ durante el período de junio-julio. Sus caudales mínimos medios mensuales fluctúan entre $180-220 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ y se mantienen principalmente por aportes de deshielos en la parte alta del Biobío como por aguas presente en las napas. El curso fluvial acoge varias centrales hidroeléctricas que representan gran parte de la generación energética en Chile (Valdovinos y Parra, 2006; MOP-DGA, 2011).

Luego de interactuar con diferentes unidades morfológicas en sus 380 km de trayecto, el río Biobío llega al norte del golfo de Arauco para desembocar al océano pacífico. Es en esta última zona donde se ha evidenciado una nueva respuesta hidráulica y una alteración en su ecosistema; en un análisis de las últimas crecidas de caudal se determinó que la infraestructura del puente Llacolen frente a los nuevos caudales no cumple con las alturas de revancha requeridas (Soberon, A., 2015), las estructuras de protección han provocado cambios en los patrones de depositación/erosión local (Escobar, M., 2013), y finalmente un estudio sobre la barra de sedimentación en ribera sur del río Biobío, encontró un aumento del área de depositación y un incremento de la vegetación, la cual ha modificado la respuesta hidráulica (Fernández, M., 2013).

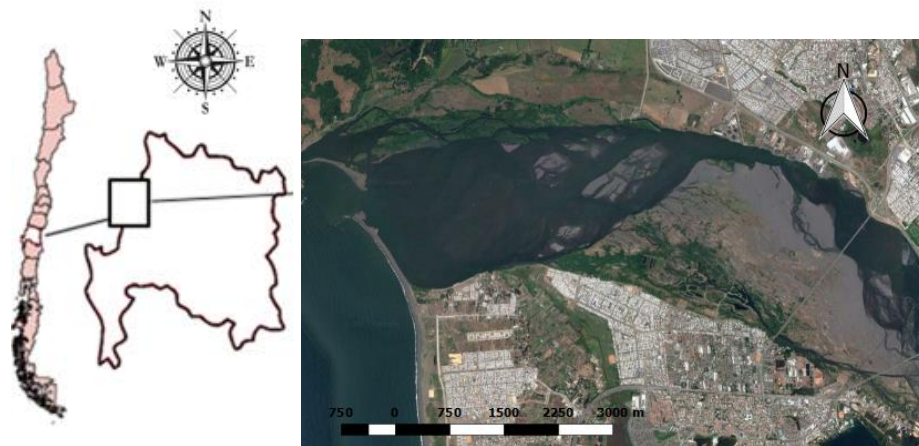


Figura 1: Zona de estudio, parte baja del río Biobío, Concepción, Chile.

3. MÉTODOS

3.1 Modelo Vegetación - CASiMiR Vegetation

El programa utiliza un modelo de equilibrio estático basado en transectos para la predicción de la futura vegetación y parámetros físicos de inundación simulados mediante un modelo hidrodinámico bidimensional. El modelo asume que el desarrollo de la vegetación depende de la relación funcional entre la hidrología, los procesos físicos y las comunidades de vegetación. Los procesos físicos representados por la altura del agua, el esfuerzo de corte y la duración de inundación funcionan como indicadores de alteración morfodinámico que permiten determinar cuándo es posible el establecimiento, desarrollo o retroceso de la vegetación. La vegetación se considera en el modelo en tres diferentes estados: pionera, arbustos y bosques, el análisis del programa genera nuevas clasificaciones de acuerdo a su fases de sucesión o a la etapa de desarrollo en que se encuentre la vegetación (rangos de edad definidos en años).

El modelo se divide en tres sub-modelos: selección, alteración morfodinámica y estrés fisiológico. La selección, evalúa si habrá o no tiempo para la creación de la vegetación, la cual ocurre sólo en suelo estéril (fase inicial). La alteración morfodinámica utiliza el esfuerzo de corte como indicador de perturbación. Este submodelo evalúa si el esfuerzo cortante máximo del año en el río es mayor que la resistencia ($\frac{N}{m^2}$) de la vegetación. Donde se cumpla esta condición, la fase de la sucesión vuelve a la fase inicial o anterior. La vegetación a medida que cambia, ya sea, avanzando o retrocediendo en su crecimiento podrá modificar su resistencia. Estrés fisiológico representa la cantidad de tiempo que una zona se inunda durante una temporada o un año. En el submodelo, duración de inundación, se considera que una fase de sucesión (fase impactada) vuelve a una fase más joven (fase reciclado) en respuesta al impacto durante la duración de la inundación. Los impactos se clasifican en clases alto, medio y bajo dependiendo del número de días inundados. Los impactos durante la inundación (bajo, medio o alto) producen reciclaje parcial o total de la vegetación. En el primer y segundo caso, la fase de sucesión vuelve a una fase anterior, mientras que en la tercera, la fase impactada pasa a fase inicial.

3.2 Modelo Hidráulico – FaSTMECH de iRIC

Para obtener las variables hidráulicas en la parte baja de río Biobío se utilizó el módulo FaSTMECH de la plataforma iRIC. FaSTMECH o “Flujo y transporte de sedimentos en canales con características morfológicas de evolución” utiliza un sistema de coordenadas ortogonales curvilíneo estructurado (Nelson, Bennett & Wiele, 2003) y asume un flujo incompresible, hidrostático, y cuasi-estacionario. FaSTMECH es cuasi-tridimensional, lo que significa que el modelo resuelve las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento promediadas en la columna de agua, y luego utiliza los resultados por capas para asignar la estructura

correspondiente al flujo. Además, el modelo calcula las componentes de flujo secundarias utilizando una viscosidad de remolino isotrópica caracterizada por la profundidad local y el esfuerzo de corte; La primera aproximación, para todo el desarrollo, es que el flujo se supone incompresible. Esta es una buena suposición siempre que las velocidades de flujo sean mucho menores que la velocidad del sonido, una condición que es bien satisfecha en los flujos del río Biobío. El uso de este supuesto se refleja en las ecuaciones (1) y (2) de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento, respectivamente.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{g} + \nu \cdot \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

Donde:

$$\vec{u} = \text{vector de velocidad} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \rho = \text{densidad del flujo} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad P = \text{presión} [Pa]$$

$$g = \text{gravedad} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \nu = \text{viscosidad cinemática} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad t = \text{tiempo} [s]$$

Otra característica de este programa es el uso del supuesto hidrostático, ecuación (3), que da lugar a que la presión se distribuye hidrostáticamente en la vertical, lo que significa que la presión es equivalente al peso del fluido por unidad de área en cualquier punto.

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta P}{\delta z} - g = 0 \quad (3)$$

Esta simplificación es correcta cuando las componentes verticales de velocidad son pequeñas, esta situación es válida en escenarios con pendientes de fondo pequeñas a lo largo de la dirección del flujo, en caso contrario esta suposición puede inducir significativos errores.

Los gradientes de presión en las ecuaciones horizontales de movimiento se pueden escribir en términos de la elevación de la superficie del agua mediante la integración en la vertical (i.e. “z”) y diferenciar el resultado en cada dirección horizontal:

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta P}{\delta x} = -g \cdot \frac{\delta E}{\delta x} \quad (4)$$

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta P}{\delta y} = -g \cdot \frac{\delta E}{\delta y} \quad (5)$$

Estas relaciones simplifican la solución del sistema de ecuaciones descrito por (1) y (2), ya que reducen la determinación de la presión en cada (x, y, z) de ubicación en el flujo a solo la determinación de la elevación de la superficie del agua en cada (x, y) de ubicación horizontal.

3.3 Datos modelos vegetación e hidráulica

Para generar el modelo dinámico de vegetación, se establecieron como periodos de evaluación los años 1998, 2009 y 2014. Por tanto, para estos años se deben extraer los parámetros físicos generados en el modelo hidráulico y, discretizar a través de imágenes satelitales el cauce y el tipo de vegetación existente según sea pionera, arbustiva o arbórea. La clasificación según el tipo de vegetación y cauce, servirá en el modelo de vegetación como contraste en el resultado simulado, mientras, que en el modelo hidráulico a las imágenes discretizadas se le asignaran valores del parámetro de rugosidad “n” de Manning para utilizarlas como archivos de rugosidad variable en el espacio. Los valores de rugosidad serán determinados por el método de Cowan (Chow, 2004).

En la construcción de la batimetría se utilizaron los datos del proyecto INNOVA N°12.245-EM.TES y datos topográficos obtenidos por el proyecto FONDECYT N° 11100399. La combinación de ambos sets de datos procesados mediante la herramienta de interpolación trigonométrica (TIN'S), que ofrece el software, permite obtener una superficie detallada del lecho del río fundamental para el análisis hidráulico. La estimación de la descarga asociada a los caudales diarios máximos anuales con período de retorno de <2, 2, 5, 10, 25, 50, 100,> 100 años se calcularon con el registro de caudales de la estación DGA-MOP denominada "Río Biobío en Desembocadura", Código Banco Nacional de Aguas (BNA) 08394001-8 y que se encuentra ubicada en el dominio de modelación definido para este estudio.

El modelo hidráulico precisa una estimación inicial de la elevación de la superficie del agua para cada nodo del dominio (i.e. condición inicial de modelación). Esta estimación proporciona un punto de partida en el modelo numérico, ayudando a determinar en el cálculo los nodos que se encuentran húmedos y aquellos que están secos. Cabe notar que elevaciones de la superficie inicial del agua ajustadas a la realidad conducen a la rápida convergencia del modelo, consecuentemente se utiliza la herramienta dispuesta en el software y que consiste en un módulo 1D step-backwater. Este módulo estima el eje hidráulico unidimensional sobre la base de una condición de borde de aguas abajo (i.e. flujo subcrítico) y un caudal entrante al dominio de modelación. La solución del cálculo 1D se ocupa como condición inicial para la modelación 2D.

Para utilizar los resultados de la modelación hidráulica en la modelación dinámica de la vegetación, es necesario convertir los resultados hidráulicos de vector de puntos a raster de puntos (figura 2). Realizando esto, se obtienen los mapas digitales con la distribución espacial del esfuerzo de corte, la velocidad, la profundidad y la elevación de la superficie de agua en todo el dominio de modelación.

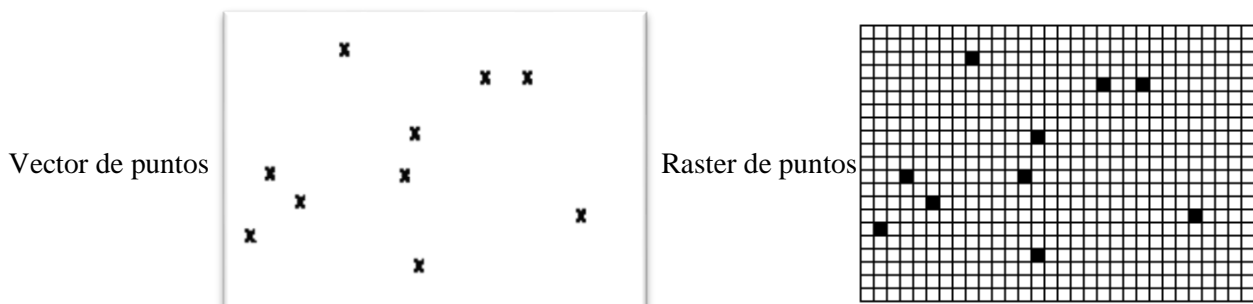


Figura 2: Ejemplo conversión de formatos.

Lo mismo se realiza con el archivo de rugosidad creado para el modelo hidráulico, es decir, las 3 imágenes discretizadas por tipo de vegetación y cauce, ahora se ingresarán como mapas digitales al modelo de vegetación.

Disponibles los mapas digitales de los parámetros hidráulicos y la distribución espacial de la rugosidad, se utiliza la información sobre la vegetación presente en el dominio de modelación para crear el módulo de inicio que se emplea en el software CASiMiR. Este módulo de inicio es un módulo estático encargado de dar las condiciones de partida para el módulo dinámico.

La información sobre la vegetación en la zona de estudio es que la presencia de comunidades vegetales en este sector es de carácter relictual, provocando un conjunto de elementos florísticos de difícil interpretación. Es una zona mesomórfica con predominio de vegetación arbustiva y arbórea. El estrato arbóreo oscila alrededor de los 20 metros de altura encontrando principalmente Salix y Acacia. En el estrato arbustivo se observa la misma clase de vegetación sólo que de menor tamaño. Por esta razón el módulo estático se genera con estas clases de vegetación, y su clasificación se realiza de acuerdo a la altura en que se presente.

El módulo dinámico evalúa distribución espacial y dinámica de la vegetación inundable basada en la vegetación inicial, o la del año anterior, y cinco parámetros físicos: topografía, elevación de la superficie de agua, tipo de vegetación, esfuerzo de corte, y la duración de inundación. El modelo se utiliza en un paso de

tiempo anual para simular la vegetación en el área de estudio. Tres etapas de vegetación fueron incluidas en la simulación: colonización, transición y madura; calibradas y validadas en un número total de celdas de 309.855 (*celda* = 15x15m) equivalentes a un área total de 69,7 km².

En cuanto a la regresión, se consideraron dos tipos de estrés que conducirán a un retroceso de la vegetación: a) esfuerzo de corte y b) duración de la inundación. Los umbrales del esfuerzo de corte y la duración de inundación para cada tipo de vegetación son diferentes y fue asignado en base a la edad de la vegetación utilizando datos de la literatura (Infor, 2010; Fuentes-Ramírez, A.; Pauchard, A.; Marticorena, A.; & Sánchez, P., 2010; Thomas, L.; 2015). Finalmente, los valores se optimizaron durante el proceso de calibración. Si cualquier tipo de vegetación existente, es destruida por el esfuerzo de corte, la vegetación se convierte en barra libre. La intensidad de la perturbación se clasificó en las clases alta, media y baja en función del número de días que un área se inunda durante el período que crece la vegetación. Se consideró que, si la perturbación de una clase específica se produce en cualquier lugar la vegetación existente será destruida y volverá a la clase anterior o inicial.

Una vez finalizada la modelación dinámica de vegetación se realizaron pruebas para determinar la efectividad del modelo en la parte baja del río Biobío. Es decir, se evalúan, a través de parámetros de exactitud, la concordancia con los mapas digitales de vegetación observados. De esta manera el parámetro que se medirá será el de la precisión global (OA), el cual corresponde a la proporción de celdas con vegetación que se predicen correctamente de acuerdo al número total de celdas. Para analizar el efecto de escala en la concordancia entre los mapas, se analiza cómo varían los resultados con un tamaño de celda diferente al ya modelado. Para efectos del estudio se ejecuta el modelo para celdas de 30x30m y 50x50m.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis de frecuencia

Con la información entregada por la estación Desembocadura del río Biobío se estimó la descarga diaria máxima media anual para cada año comprendido dentro del período 1982-2013, se determinó la descarga asociada a <2, 2, 5, 10, 25, 50, 100,> 100 años de período de retorno. Cabe notar que la distribución de probabilidad que mejor se ajustó fue la Log Pearson de 3 parámetros.

Tabla 1: Caudal para períodos de retornos

Período de retorno	Caudal [$\frac{m^3}{s}$]
<2	2.317,5
2	5.821,6
5	8.720,4
10	10.603
25	12.909
50	14.568
100	16.176
>100	17.743

4.2 Batimetría

Las figuras 3 y 4 corresponden a la batimetría utilizada en la modelación hidráulica y al ajuste que realiza la grilla con la batimetría.

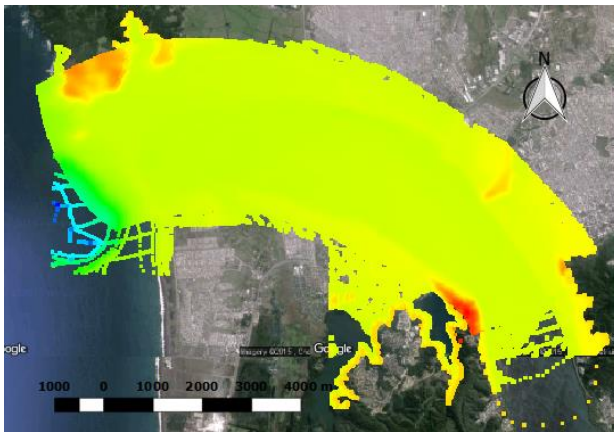


Figura 3: Puntos registrados en terreno y recopilados de otros estudios para definir la batimetría en el dominio de modelación.

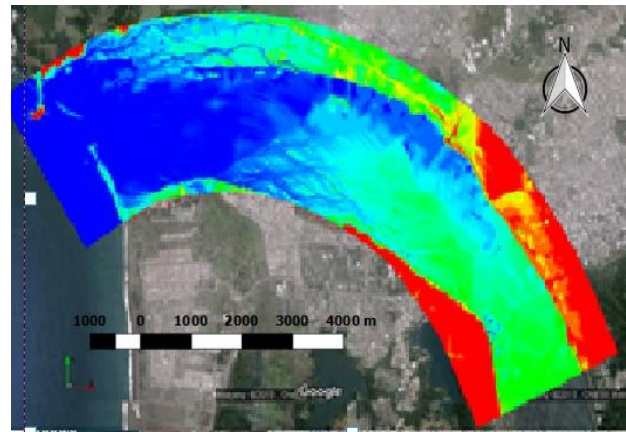


Figura 4: Batimetría interpolada.

4.3 Rugosidad / Coeficiente n de Manning.

Comparando los valores obtenidos con la fórmula Cowan y los valores obtenidos en la recopilación bibliográfica de diferentes estudios realizados en la parte baja del río Biobío se observaron diferencias, por lo cual, se realizaron calibraciones con rangos de valores que se observan en la tabla 2.

Tabla 2: Intervalos Coeficiente de Manning

Polígono de rugosidad	Coeficiente de Manning (n)
Cauce principal	0,032-0,037
Barra libre y vegetación pionera.	0,038-0,045
Arbustos	0,045-0,05
Arboles	0,06-0,08
Zona San Pedro de la Paz – Concepción	0.1

Luego de análisis del parámetro n de Manning a través de escenarios conocidos (caudal-altura), se determinaron los siguientes valores por cada polígono de vegetación:

Tabla 3: Valor Calibración Coeficiente de Manning

Polígono de rugosidad	Coeficiente de Manning (n)
Cauce principal	0,033
Barra libre y vegetación pionera.	0,043

Arbustos	0,048
Arboles	0,07
Zona San Pedro de la Paz – Concepción	0,1

4.4 Condición de borde

La sensibilidad del modelo a la condición de borde aguas abajo, se determinó graficando los perfiles longitudinales para estados de marea comprendidos desde la altura $h = 0,6m$ hasta $h = 1,30m$. Desde la menor altura se fue incrementando $0,10m$ hasta alcanzar la altura mayor, obteniendo 8 simulaciones. Un ejemplo de lo que se realizó, se indica en la figura 5 donde se observan los perfiles longitudinales para el caudal de $2.317,5 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ y las diferentes condiciones de borde aguas abajo. La imagen superior es el perfil longitudinal completo del área modelada, mientras que la imagen inferior tiene la escala horizontal exagerada para observar las líneas de color que representan la variación de marea, la línea azul representa el punto en donde las elevaciones de la superficie comienzan a tener mismos valores.

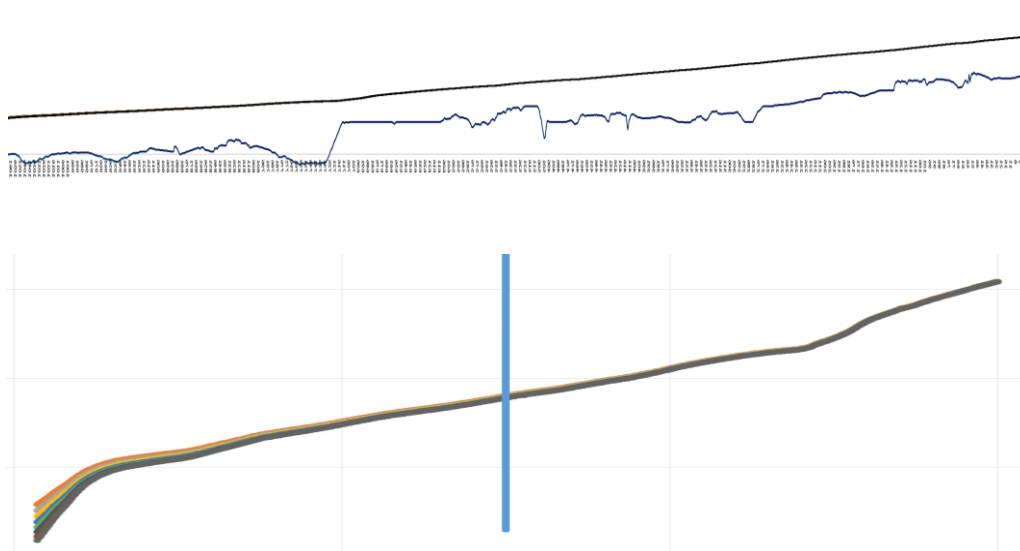


Figura 5: Perfil Longitudinal de la zona baja del río Biobío.

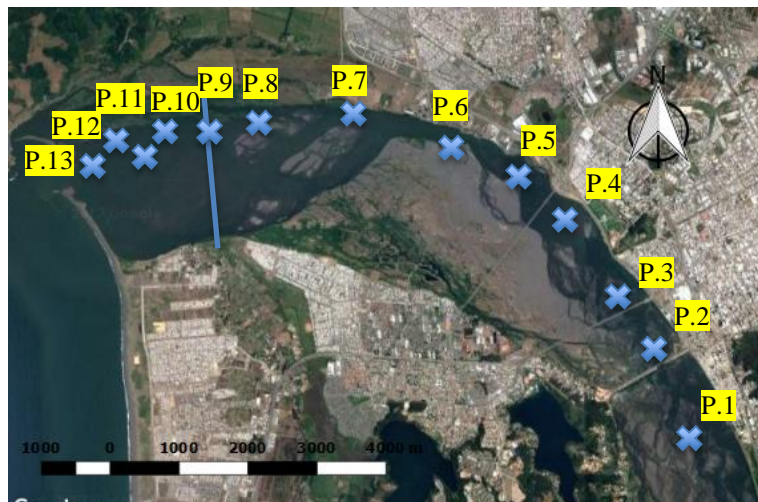


Figura 6: Influencia variación de la marea en la zona de estudio.

La línea azul vertical que se aplicó en las figuras 5 y 6, simboliza hasta qué punto las superficies de elevación del agua arroja diferencias según la condición de borde aguas abajo, al comparar el registro de elevaciones después de la línea azul no registra diferencias significativas tal cual se indica en la tabla 4.

Tabla 4 Elevación superficie de agua para puntos aguas arriba y aguas abajo de la línea azul de la figura 6.

Perfil/Condición de borde	W.S.E. (msnm)								Desviación estándar
	1,3m	1,2m	1,1m	1m	0,9m	0,8m	0,7m	0,6m	
P.1	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	0,00
P.2	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	5,83	0,00
P.3	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	0,00
P.4	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	0,00
P.5	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,15	4,15	0,00
P.6	3,76	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	0,00
P.7	3,24	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	0,00
P.8	2,83	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	2,81	0,00
P.9	2,81	2,80	2,79	2,79	2,78	2,78	2,78	2,78	0,01
P.10	2,58	2,57	2,56	2,55	2,55	2,55	2,54	2,54	0,01
P.11	2,28	2,26	2,24	2,23	2,22	2,22	2,21	2,21	0,02
P.12	2,14	2,12	2,10	2,08	2,07	2,06	2,05	2,05	0,03
P.13	1,74	1,69	1,64	1,60	1,56	1,52	1,49	1,47	0,09

*wse: Elevación superficie de agua.

*P.9 registro de elevaciones sobre línea azul.

Con esto queda claro que la variación de marea no afecta a la zona de estudio, por lo tanto, el uso de la condición de borde aguas abajo $h = 1m$ y la utilización del módulo 1D step-backwater para todas las simulaciones es correcto.

4.5 Parámetros simulados

Los resultados que se obtuvieron en la modelación hidráulica y posterior conversión de formato se representan en la figura 7.

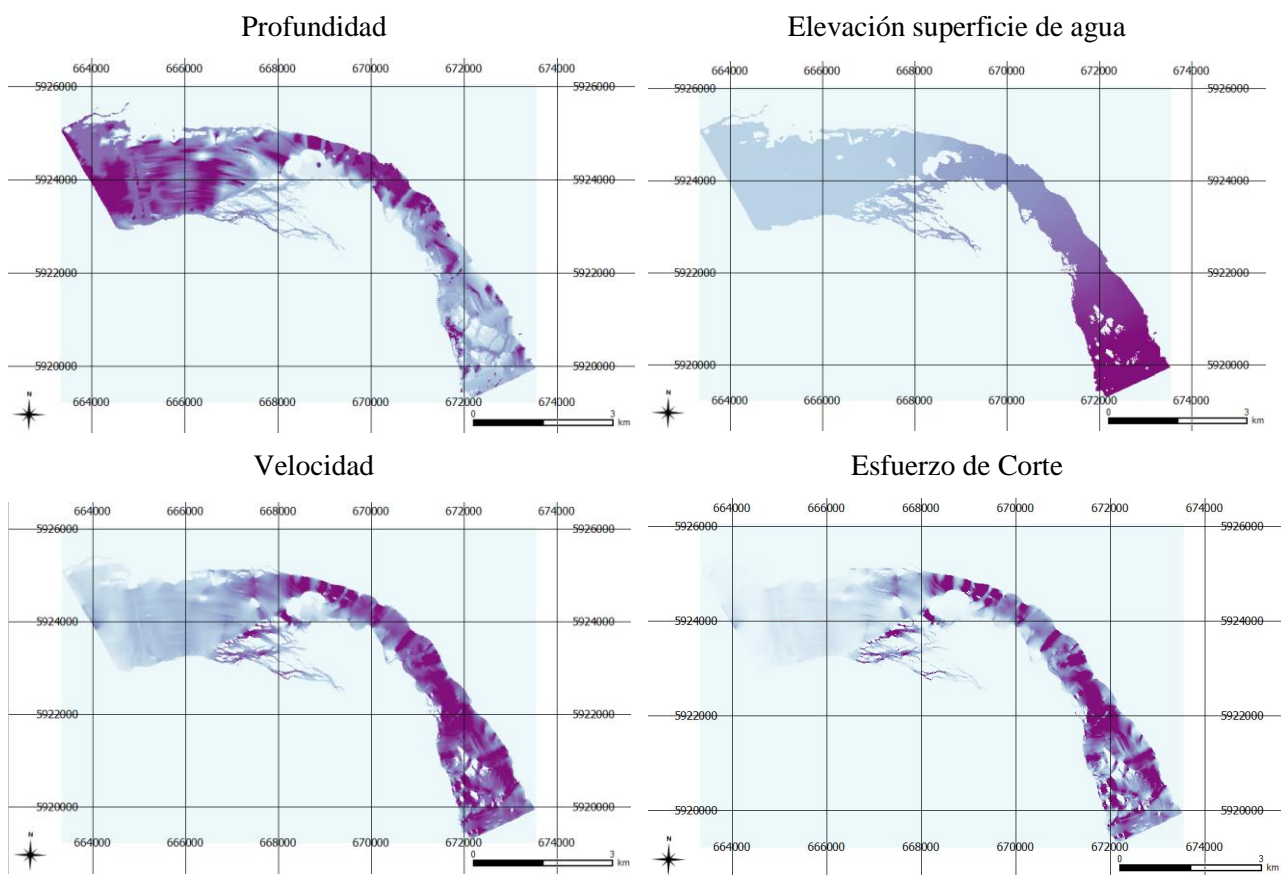


Figura 7: Parámetros hidráulicos estimados para el año 1998 y un caudal de $200 \left[\frac{m^3}{s} \right]$

Con la información recopilada, se analizó comportamiento de las variables hidráulicas a través de gráficos de caja que comprenden los valores en todo el dominio.

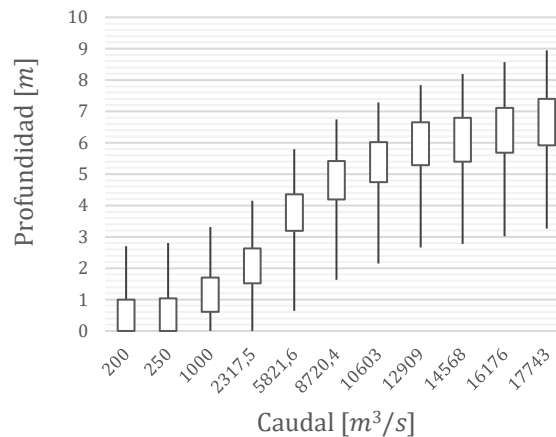


Figura 8: Profundidades registradas para los diferentes períodos de retorno (1998).

El comportamiento de la profundidad para 1998 se puede separar en 3 intervalos según la figura 8. Entre el caudal $200 \frac{m^3}{s}$ al $250 \frac{m^3}{s}$ no se diferencian gráficamente. En cambio para el tramo de $1.000 \frac{m^3}{s}$ al $12.909 \frac{m^3}{s}$ se observa claramente una pendiente de crecimiento mayor en comparación al intervalo anterior y al intervalo entre $12.909 \frac{m^3}{s}$ al $17.743 \frac{m^3}{s}$ que tiene una pendiente más suavizada. Gráficamente se arroja que las profundidades alcanzan valores más cercanos a la máxima altura que al mínimo.

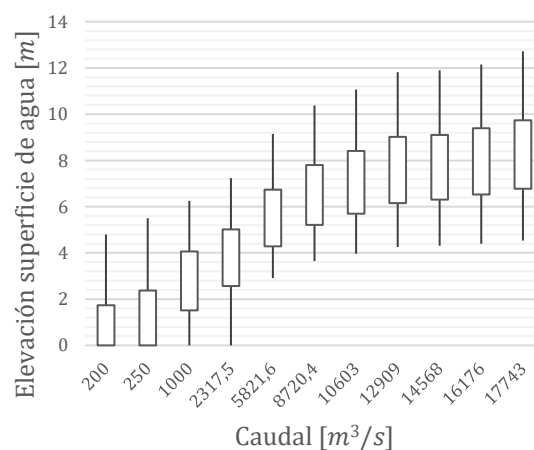


Figura 9: Superficies de agua registradas para los diferentes períodos de retorno (1998).

En la figura 9 que corresponden a las elevaciones de superficie de agua se observa un comportamiento similar a la profundidad en cuanto al incremento de las variables, pero la elevación de la superficie de agua alcanza valores más cercanos al mínimo.

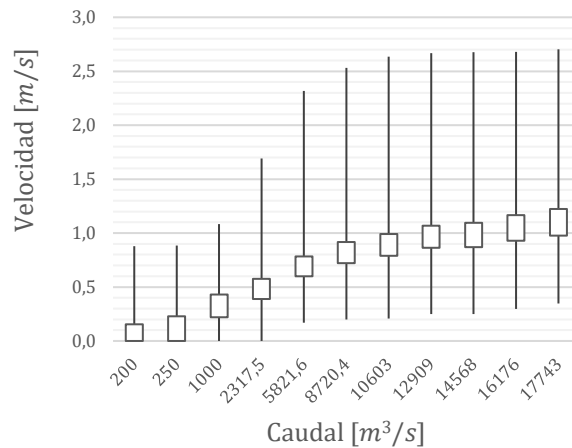


Figura 10: Velocidades registradas para los diferentes períodos de retorno (1998).

La figura 10 que corresponde al gráfico de velocidades, se observa un comportamiento lineal en el incremento de las velocidades. A diferencia de las variables anteriores, las velocidades arrojan valores extremos alejados de la media de la velocidad.

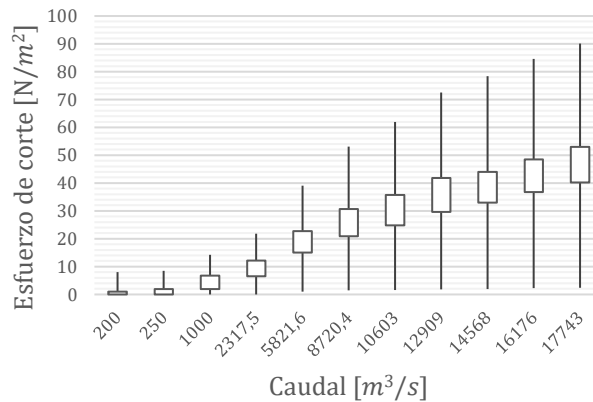


Figura 11: Esfuerzos de corte registrados para los diferentes períodos de retorno (1998).

Según la figura 11 que recopila los esfuerzos de corte para los escenarios modelados, su pendiente de crecimiento es constante y los valores extremos, ya sean, mínimos y máximos se comportan de igual manera en relación a las medias del 25% y 75% de los datos.

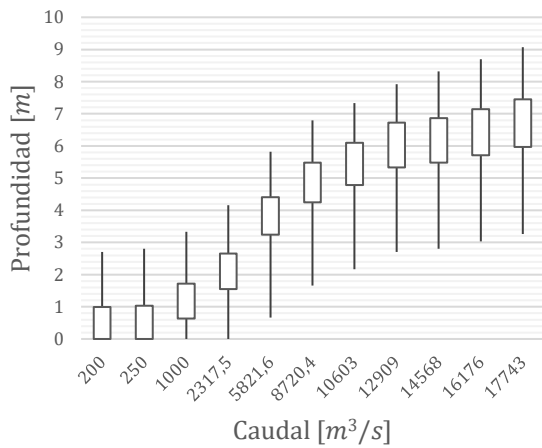


Figura 12: Profundidades registradas para los diferentes períodos de retorno (2009).

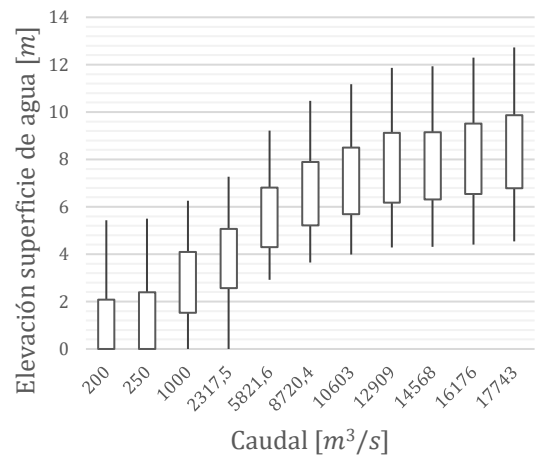


Figura 13: Superficies de agua registradas para los diferentes períodos de retorno (2009).

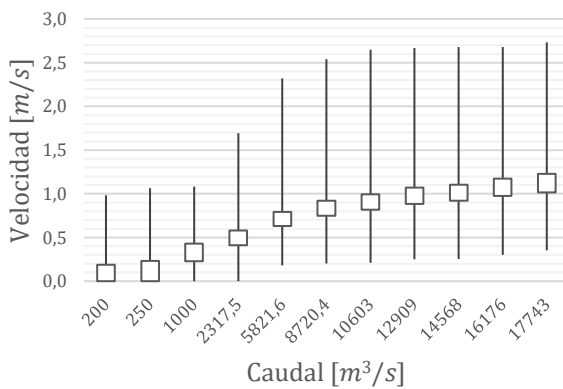


Figura 14: Velocidades registradas para los diferentes períodos de retorno (2009).

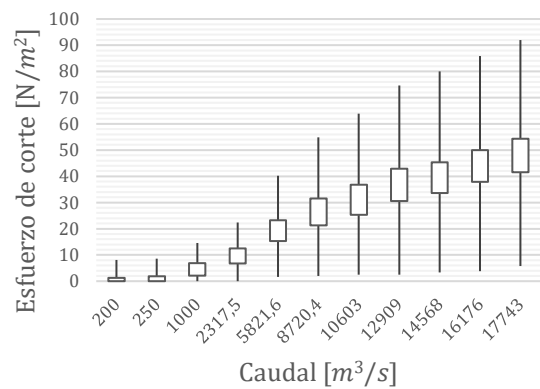


Figura 15: Esfuerzos de corte registrados para los diferentes períodos de retorno (2009).

En las figuras 12, 13, 14 y 15 se observan los valores asociados a profundidad, superficie de agua, velocidad y esfuerzo de corte del año 2009 respectivamente. En la figura 14 podemos ver cómo evoluciona la velocidad a medida que aumenta la descarga en el río. En el caso de las profundidades los valores mínimos están más cercanos a los datos registrados.

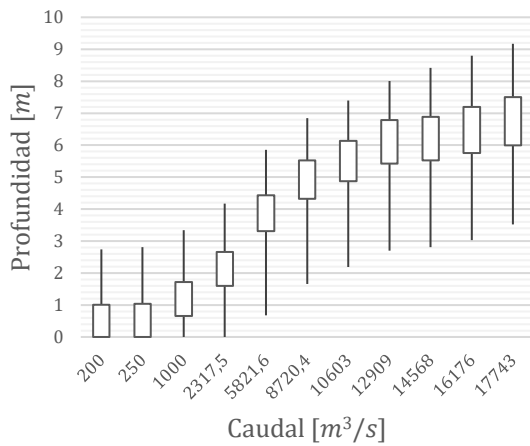


Figura 16: Profundidades registradas para los diferentes períodos de retorno (2014).

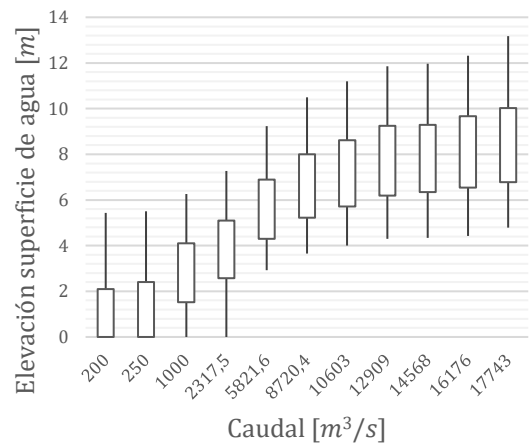


Figura 17: Superficies de agua registradas para los diferentes períodos de retorno (2014).

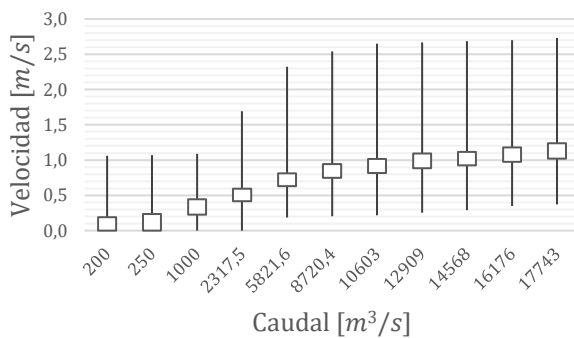


Figura 18: Velocidades registradas para los diferentes períodos de retorno (2014).

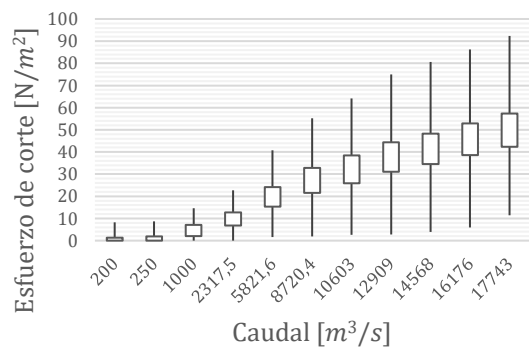


Figura 19: Esfuerzos de para los diferentes períodos de retorno (2014).

En las figuras 16, 17, 18 y 19 se observan los valores asociados a profundidad, superficie de agua, velocidad y esfuerzo de corte del año 2014 respectivamente. En la figura 19 podemos ver cómo evoluciona el esfuerzo de corte a medida que aumenta la descarga en el río.

Finalmente, se puede resumir que en el río estudiado las variables incrementan rápidamente sus valores para las descargas con períodos de retorno igual a 1.01-2-5 años, es decir, caudales con mayor probabilidad de ocurrencia. Para los caudales superiores el río refleja un incremento constante en sus variables. En el caso de la velocidad según las figuras 10, 14 y 18 se alcanzan valores extremos superior al 75% de los datos. Los datos de elevaciones de superficie de agua se comportan de manera más uniforme, teniendo valores extremos más cercanos al comportamiento general de los datos.

Luego de exponer el comportamiento de las variables hidráulicas a medida que incrementa la descarga, se realiza el análisis de comportamiento de las mismas celdas con un mapa de rugosidad diferente. En la tabla 5 se resume el comportamiento de las variables en porcentajes y divididos por intervalos de tiempo. El primer intervalo corresponde al período 1998 al 2009, en este se observa que los porcentajes de variación de la profundidad corresponden a un promedio de 0,72% para valores máximos y un 0,83% para el cuartil 3, para la elevación de la superficie de agua es un promedio de 1,55% para valores máximos y de 2,48% para el cuartil 3, para la velocidad un promedio un 2,68% para valores máximos y de 2,13% para el cuartil 3, para el esfuerzo de corte es un promedio un 2,38% para valores máximos y de 4,30% para el cuartil 3.

Tabla 5: Variación porcentual de un mismo punto en los modelos 1998-2009-2014

		Incremento porcentual promedio para valores extremos máximos y el cuartil 3 de los datos. (%)			
		Esfuerzo de corte	WSE	Velocidad	Profundidad
Máximos	1998-2009	2,38	1,55	2,68	0,72
	2009-2014	0,70	0,40	0,94	0,83
	1998-2014	3,06	1,95	3,54	1,54
Cuartil 3	1998-2009	4,30	2,48	2,13	0,83
	2009-2014	3,69	1,01	1,83	0,56
	1998-2014	7,85	3,48	3,93	1,38

Haciendo un resumen total del período en el que se evaluaron las propiedades físicas del río se puede decir que los valores extremos registrados tuvieron un menor incremento en comparación al cuartil 3, según lo indicado en la tabla 5.

4.6 Modelo de inicio y dinámico.

La información que se recopila de la vegetación existente en la zona de estudio se resume en la tabla 6. En esta tabla recogemos las alturas en que se definieron las etapas de sucesión. Para que un tipo de vegetación fuese definido como fase pionera debe medir menos de 30cm. Una vez que la vegetación supere los 30cm pero sea menor a 2m se definirá como un arbusto y cuando la logre la altura igual o mayor a 2m se definirá como una fase madura.

Tabla 6: Módulo de inicio.

		Especies de pantas				
Etapas de sucesión y fases	Tipo de vegetación	Especies de plantas pioneras dominantes (nombre común)	Nombre común	Nombre científico	% Sobrevida	Δ Altura (cm)
Etapas de Colonización						
Fase inicial	Barra de arena	Barra de arena sin vegetación				
Fase pionera (altura<0.3m)	Vegetación pionera	Barra de arena				
		Sauce	Sauce llorón	Salix humboldtiana	29,2*	15*
		Acacia	Acacia	Acacia dealbata	8,3**	23,2**
Etapas de Transición						
Fase de arbusto (0.3m>altura 2<m)	Arbusto	Sauce	Sauce llorón	Salix humboldtiana	54,2*	36,3*
		Acacia	Acacia	Acacia dealbata	13,3**	72,6**
Etapas Maduras						
Fase de bosque maduro (altura>2m)	Bosque maduro	Sauce	Sauce llorón	Salix humboldtiana	84,8*	62,3*
		Acacia	Acacia	Acacia dealbata	76,6**	88,4**

*3meses**15meses

En cambio el módulo dinámico quedó determinado de la siguiente forma:

Tabla 7: Módulo dinámico

Etapa de sucesión y fases	Tipo de vegetación	Condición				
		Esfuerzo de corte (Ssc) (N/m ²)	Condición	Resultado	Duración Inundación (DI)	Resultado
Etapa colonización						
Fase inicial	Barra de arena					
Fase pionera (altura<0.3m)	Vegetación pionera	5	Ss>Ssc	Fase inicial	DI=F	Fase inicial
					DI=M	Fase inicial
					DI=B	Fase inicial
Etapa de Transición						
Fase de arbusto (0.3m>altura <2m)	Arbusto	5-9	Ss>Ssc	Fase pionera	DI=F	Fase inicial
					DI=M	fase pionera
					DI=B	fase pionera
Etapa Madura						
Fase de bosque maduro (altura>2m)	Bosque maduro	9-21	Ss>Ssc	fase arbusto	DI=F	fase pionera
					DI=M	fase arbusto
					DI=B	fase arbusto

Ss: esfuerzo de corte máximo registrado en el año.

La inundación de la vegetación, se clasifica según sea fuerte (F), media (M) o baja (B) que corresponde a los días que dure la inundación. Para la inundación que dure más de 150 días se considera fuerte (F), para una entre 120-150 días se considerará media (M), y para una que dure entre 90 a 120 días se considerará baja (B).

Los mapas de vegetación digital elaborados a partir de imágenes satelitales que se utilizaron en modelo hidráulico y luego en el modelo dinámico de vegetación se pueden observar en las figuras 20, 21 y 22, que corresponden a los años 1998-2009-2014 respectivamente. En estas figuras se pueden observar cómo queda la clasificación según el tipo de vegetación. En estas figuras se ve claramente un incremento de la vegetación en la barra de sedimentación.

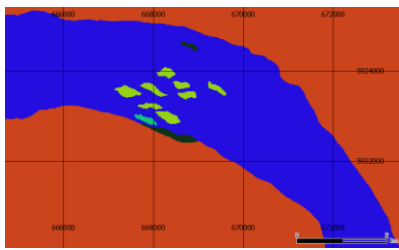


Figura 20: Mapa de Vegetación 1998.

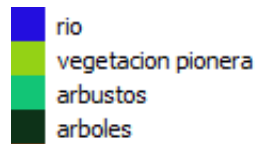
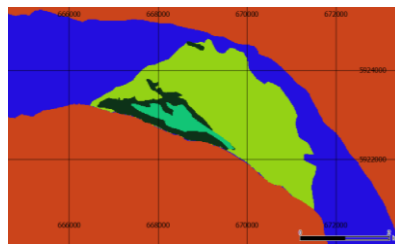


Figura 21: Mapa de Vegetación 2009.

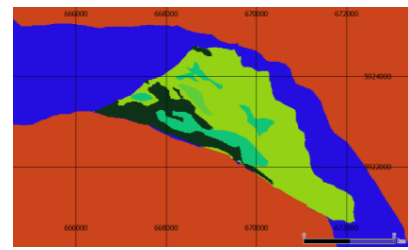


Figura 22: Mapa de Vegetación 2014.

Los resultados que se obtuvieron de la simulación dinámica de la vegetación se contrastan con las imágenes de vegetación esperada. Este contraste por año, se puede ver en las figuras 23, 24 y 25, siendo la imagen inferior la vegetación simulada.

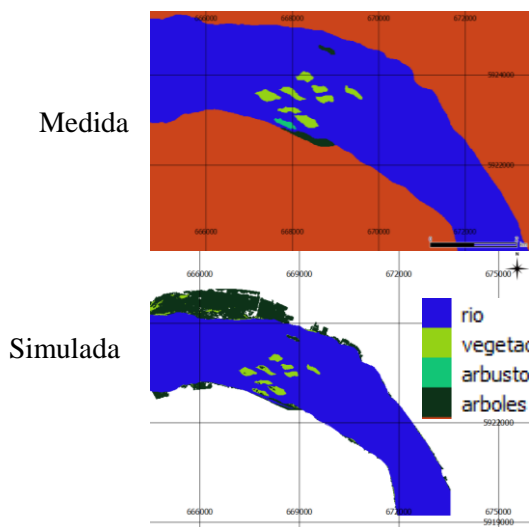


Figura 23: Mapa de Vegetación 1998.

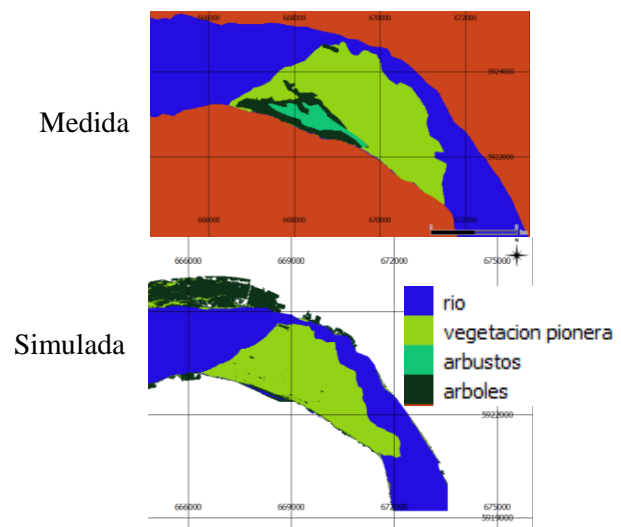


Figura 24: Mapa de Vegetación 2009.

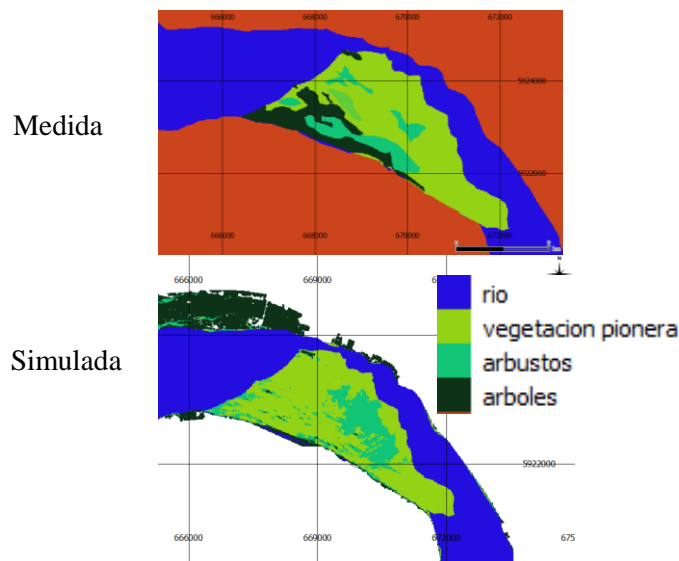


Figura 25: Mapa de Vegetación 2014.

En primer lugar, al analizar el crecimiento de la vegetación de acuerdo a los registros visuales que se utilizaron, se determinó que el incremento de vegetación durante el período 1998 al 2009 fue de un 1612,7% para el tipo “barra con vegetación incipiente”, por el lado de la vegetación tipo “arbusto” fue de un 1062,4% y finalmente los arboles tuvieron un crecimiento alrededor de un 607,2%. Para el período comprendido entre el 2009 al 2014 se determinó un porcentaje de crecimiento de 219,4% para el tipo “arbusto” y un 140% para el tipo “arboles”. El porcentaje de crecimiento para el tipo “barra con vegetación incipiente” fue negativo, es decir, hubo un retroceso en las áreas donde se clasificó con esa categoría. En consideración a la evolución total que tuvo la vegetación en el período estudiado, es decir, desde 1998 al 2014, hubo un crecimiento porcentual del 1609%, 2330,5% y 849,9% para los tipos de vegetación: “barra libre con vegetación incipiente”, “arbustos” y “arboles” respectivamente.

Tabla 8: Resumen crecimiento vegetación según su clasificación

Tipo de vegetación	Área [km ²]		
	1998	2009	2014
Barra con vegetación incipiente	0,51	8,16	8,14
Arbusto	0,05	0,58	1,26
Arboles	0,18	1,09	1,52

Analizando la simulación de la vegetación que se realizó en el software CASiMIR, se encontró que la precisión global OA para el año 1998 fue de un 78%. Este valor se explica ya que los tipos de vegetación “barra libre con vegetación incipiente” y “arboles” tuvieron un porcentaje alto de celdas predichas correctamente, mientras que la vegetación tipo “arbusto” tuvo un porcentaje bajo, cercano a 0. En el caso de la simulación del año 2009 se calculó una precisión global OA=42%, en este año el mayor porcentaje de celdas predichas correctamente fue la vegetación “barra libre con vegetación incipiente”, pero los otros 2 tipos de vegetación tuvieron un

bajo nivel de celdas calculadas correctamente. El último modelo correspondiente a la vegetación del año 2014, tuvo una precisión global OA= 53%, este valor corresponde principalmente a la vegetación “barra libre con vegetación incipiente”, mientras que los otros tipos de vegetación alcanzaron un porcentaje de celda predicción bajo. Con estos resultados, se observa que el modelo fue capaz de predecir con mayor precisión la vegetación tipo “barra libre con vegetación incipiente”, mientras que, en el caso de la vegetación tipo “arbusto” existe una predicción, pero que no corresponde al lugar donde debiera desarrollarse, y para el caso de la vegetación tipo “árboles”, el modelo no es capaz de predecir el desarrollo de estos árboles como lo ha sido en el caso real.

En cuanto al efecto de escala, en la figuras 26, 27 y 28 se pueden observar las vegetaciones simuladas y remuestreadas para los 2 nuevos tamaños de celda. En cuanto al efecto de escala para el año 1998, es bajo debido a que principalmente no existe mucha vegetación que provoque grandes cambios en las celdas predichas.



Figura 26: Mapa de vegetación simulado año 1998 con una celda de 15x15m.

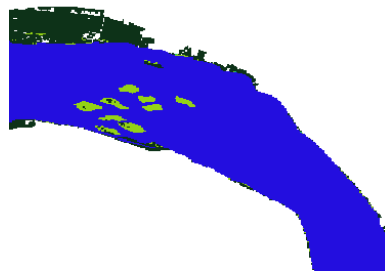


Figura 27: Mapa de vegetación remuestreados año 1998 celda de 30x30m.



Figura 28: Mapa de vegetación remuestreados año 1998 celda de 50x50m.

En relación al año 2009, el efecto de escala es mayor debido que se modificaron celdas que habían sido predichas correctamente por vegetación que no corresponde.



Figura 29: Mapa de vegetación simulado año 2009 con una celda de 15x15m.

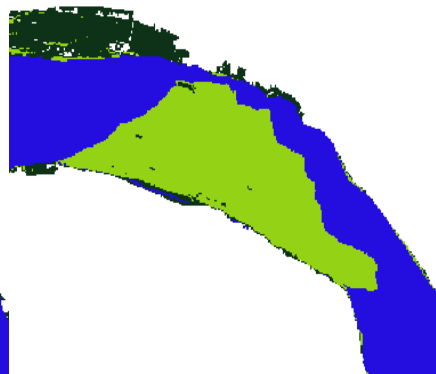


Figura 30: Mapa de vegetación remuestreados año 2009 celda de 30x30m.



Figura 31: Mapa de vegetación remuestreados 2009 celda de 50x50m.

En el año 2014 el efecto de escala aumenta el error de predicción, ya que, la vegetación que cubría pocas áreas e incluso eran sólo puntos, ahora se han convertido en áreas que no corresponden a la vegetación esperada. Otro efecto que se provoca es la eliminación de ciertas celdas que indicaban un tipo de vegetación diferente pero que correspondía a lo observado. Observando los resultados con una nueva de escala, se puede decir que el tamaño del raster de 15x15 tuvo un buen ajuste y no provocó mayor error en la predicción.

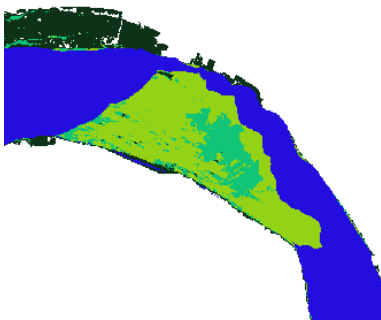


Figura 32: Mapa de vegetación simulado año 2014 con una celda de 15x15m.

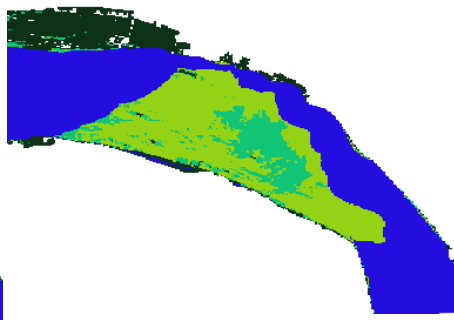


Figura 33: Mapa de vegetación remuestreados año 2014 celda de 30x30m.

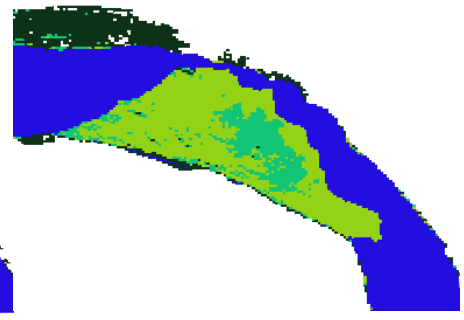


Figura 34: Mapa de vegetación remuestreados 2014 celda de 50x50m.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de dos modelos bidimensionales para el estudio permitió obtener la información necesaria para satisfacer los objetivos planteados.

El análisis de series fotográficas permitió constatar cambios morfológicos en el cauce principal del río, que al ser simulados en el software Iric se lograron replicar. Con estos modelos se pudo evidenciar el comportamiento hidráulico que ha tenido el río al crecer la barra de sedimento y la vegetación sobre ella. Gran cuidado se tomó para desarrollar los tres escenarios funcionales. Los resultados indicaron que los datos de entrada deben ser lo más preciso posible para replicar la superficie de agua observada en el modelo.

La utilización del módulo FaSTMECH para la generación del modelo hidráulico entregó varios resultados en relación al uso del mismo y las variables en estudio. La ejecución de este modelo requirió precisión en los datos de entradas. En el caso de la batimetría se necesitaba que tuviera una densidad de puntos alta puesto que la resolución de la grilla del modelo en algunos puntos quedaba con poca información para interpolar. Si se dejaban esos puntos con poca información, provocaba que el modelo simulara pendientes de fondo que modificaban el flujo, induciendo profundidades o esfuerzos de corte errados. El análisis de sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning mostró que los resultados del modelo no fueron significativamente diferentes usando rangos para este parámetro. En el análisis de la condición de borde de nuestro dominio que correspondía a la variación de marea, se encontró que en los modelos calibrados las superficies de aguas arrojaban variaciones hasta 3 km aguas arriba de la desembocadura, luego la superficie de agua no demostraba cambios al modificar la condición de aguas abajo.

La variación de la profundidad, superficie de agua, velocidad y esfuerzo de corte a raíz del incremento de la vegetación en la barra de sedimento ha sido aumentar en un 1,54%, 1,95%, 3,54% y 3,06% para sus valores extremos y un 1,38%, 3,48%, 3,93% y 7,85% según el cuartil 3. Con estos valores queda claro que la vegetación ha tenido influencia en las condiciones hidráulicas del río. Lo que es más preocupante es que cuando se dividió el período en estudio, desde 1998 al 2009 existía una influencia menor que al pasar al período desde 2009 al 2014, es decir, el incremento de las variables en el segundo periodo es el doble del primero porcentualmente.

Al clasificar la celda con un tipo de vegetación, se establece que existe la misma propiedad física en toda la región. En el caso del esfuerzo de corte, se está considerando un bloque de 15m con un valor alto a bajo. El problema ocurre que frente a un caudal de poca ocurrencia, la vegetación que realmente existe puede sufrir un retroceso en el crecimiento, mientras que el modelo asumirá que es capaz de soportar los esfuerzos generados. En definitiva el modelo de vegetación es más sensible al tamaño de la grilla que los resultados del modelo hidráulico.

El modelo de vegetación basado en procesos físicos, planicies de inundación, literatura y datos observados, requirió gran capacidad de análisis. Las principales variables de entrada del modelo fueron los esfuerzos de corte y la superficie de agua. El modelo fue calibrado y validado mediante la comparación de los tipos de vegetación simulados con el campo observado. Durante la calibración, los valores de crecimiento y esfuerzo de corte se optimizaron mediante el proceso iterativo hasta que los mapas simulados fueron desarrollados. La precisión global y efecto de escala entre los mapas de inicio y módulos dinámicos fueron comparativamente baja teniendo en cuenta los tipos de vegetación individuales en ambas áreas de calibración y validación. El proceso de modelado ya había revelado la falta de conocimiento acerca de las relaciones fundamentales entre los ecosistemas de ribera y los procesos físicos. Sin embargo, un problema importante que surgió de este estudio fueron las relaciones funcionales entre los procesos físicos y dinámica de la vegetación. El modelo de vegetación desarrollado en este estudio es un paso adelante en la modelación de la dinámica de la vegetación de ribera en la escala espacial y temporal ya que se generó un modelo desde 1982 hasta el 2014.

Es difícil concluir si el modelo en el estado actual se puede utilizar para modelar la vegetación ya que, todo el estudio se basó en una batimetría, siendo necesario tener datos batimétricos de otros años. Sin embargo, puede ser justificado utilizarlo en un área menor, donde se posea o se puedan obtener más datos batimétricos.

En este estudio, los umbrales críticos de duración de la inundación para la mortalidad de diferentes tipos de vegetación se decidieron sobre la base de los estándares de diseño y literatura; Sin embargo, la relación entre la duración de la inundación y los diferentes tipos de vegetación sigue siendo un campo de investigación. Es difícil encontrar el umbral preciso para la duración crítica de la inundación para el tipo específico de vegetación que sea universalmente aplicable. El número de días de inundación que un árbol puede sobrevivir depende de la edad, el tamaño y el género de la especie, así como de la profundidad de la inundación, la temperatura, la turbidez del agua y el momento de la inundación en relación con una estación de crecimiento.

Las herramientas utilizadas en este estudio demuestran que la parte baja del río Biobío está compuesta por sistemas complejos y dinámicos que requirieron una cuidadosa evaluación de sus variables para proporcionar simulaciones adecuadas.

La composición de especies de vegetación, la diversidad y la presencia de especies de vegetación nativa en los ecosistemas de ribera dependen de la hidrología de las cuencas y la geomorfología fluvial. Los cambios en el régimen hidrológico natural como resultado de las perturbaciones antropogénicas como la operación de presas y la desviación del agua para riego han alterado los patrones de inundación naturales y consecuentemente la evolución espacial de la vegetación.

6. REFERENCIAS

- Abbe, T.B. and Montgomery, D.R., 1996. "Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers". *Regulated Rivers: Research & Management*, 12(2-3): 201-221.
- Allmendinger, N.E., Pizzuto, J.E., Potter, N., Johnson, T.E. and Hession, W.C., (2005). "Riparian vegetation and width adjustment in laterally migrating rivers of eastern Pennsylvania", *U.S.A. Geological Society of America Bulletin*, 117(1/2): 229-243.
- Anderson, R.J., Bledsoe, B.P. and Hession, W.C., 2004. "Stream and river channel width response to riparian vegetation, bank material texture, and other factors". *Journal of the American Water Resources Association*, 40(5): 1159-1172.
- ASCE, 1998. "Bank mechanics and modeling of river width adjustment, I: Processes and mechanisms". Task Committee on Hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(9): 888-902.
- Benjankar, R., Yager, E., Tonina, D., and Merz, N. (2015). "REI: riparian ecosystem index to assess the impact of hydrologic regime changes on riparian ecosystems". *Ecohydrol.*, 9: 153-166.
- Braatne, J. H., R. Jamieson, K. M. Gill, and S. B. Rood (2007), "Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the Yakima River, Washington, USA", *Riv. Res. Appl.*, 23, 247-267.

- Conesa, C., Pérez, P., García, R., Martínez, A. (2012). “Cambios históricos recientes de cauces y llanuras aluviales inducidos por la acción del hombre”.
- Chow, V.T., (2004). Capítulo 5: “Desarrollo del flujo uniforme y sus ecuaciones”, “Hidráulica de canales abiertos”. Santiago de Chile: McGraw Hill, 667 p, 96-121.
- De Beurs, K.M., Wright, C.K., Henebry, G.M. (2009). “Dual scale trend analysis distinguishes climatic from anthropogenic effects on the vegetated land Surface”. *Environmental Research Letters*, in press (September 2009).
- DGA. (2004). “Elección de la cuenca y definición de cauces”. *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Santiago, 1-3.
- DGA. (2004). “Recopilación de información y caracterización de la cuenca”. *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Santiago, 4-30.
- Elosegi, A., Diez, J., et al., (2009). Estructura física de los cauces fluviales.
- Escobar, M. (2013). Cuantificación de la erosión local en el río Biobío debido al nuevo escenario vial. Memoria.
- Fernández, M. (2013). Cambios morfológicos y efectos en las velocidades y alturas del flujo en la parte baja del río Biobío. Memoria.
- Fuentes-Ramírez, A.; Pauchard, A.; Marticorena, A.; & Sánchez, P. (2010). Relación entre la invasión de *Acacia dealbata* Link (Fabaceae: Mimosoideae) y la riqueza de especies vegetales en el centro-sur de Chile. *Gayana. Botánica*, 67(2), 188-197.
- Hupp, C.R., (2000). “Geomorphology, sedimentation, and vegetation of coastal plain rivers in southeastern United States”. *Hydrological Processes*.
- MOP-DGA. (2011). “Geología y geomorfología cuenca Bío Bío”. *Estudio hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata*, Tomo III. Santiago, 15-34.
- Lewin (1977): “Channel pattern changes”. In: *River Channel Changes* (Ed. by K. J. Gregory), John Wiley. New York, pp. 167-184.
- Micheli and Kirchner (2002). “Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 1 remote sensing measurements of streambank migration and erodibility”. *Earth Surface Processes and Landforms Earth Surf. Process. Landforms* 27, 627–639 (2002).
- Naiman, R.J., Rogers, K.H. (1997). “Large animals and system-level characteristics in river corridors. *BioScience* 47: 521–529.
- Nelson, J. M., Bennett, J. P., & Wiele, S. M. (2003). “Flow and Sediment Transport Modeling”.
- Pearlstone, L., H. McKellar, and W. Kitchens (1985), “Modelling the impacts of a river diversion on bottomland forest communities in the Santee River Floodplain, South Carolina”, *Ecol. Model.*, 29, 283–302.
- Robertson, K. M, and Augspurger, C. (1999), “Geomorphic processes and spatial patterns of primary forest succession on the Bogue Chitto River”, USA, *J. Ecol.*, 87, 1052–1063.
- Salo, J., R. Kalliola, I. Hakkinen, Y. Makinen, P. Niemela, M. Puhakka, and P. Coley (1986), “River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest”, *Nature*, 322, 254 – 258.
- Soberon, A. (2015). “Rastreo de la crecida máxima registrada en el río Biobío, aplicado a la verificación hidráulica del puente Llacolen, región del Biobío, Chile”, memoria.
- Strahler, A., Strahler, A. (1994). *Geografía Física*. Barcelona, Omega.

- Thomas,L.; (2015). “Ecological effects of willow and poplar invasions at the Río Negro in northern Patagonia, Argentina”. Memoria. Thorne, C.R., (1990). “Effects of vegetation on riverbank erosion and stability”. In: J.B. Thornes (Editor), *Vegetation and Erosion*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 518.
- Valdovinos,C.,Parra,O (2006). *La Cuenca del Río Biobío: Historia Natural de un Ecosistema de Uso Múltiple*. Publicaciones Centro EULA. 7.
- Van Heemst,C.,Willems,J.,Weller,A., van Verseveld,H.,Caamaño,D.,Aránguiz,R.(2013). “Flood defence alternatives for the lower Bío Bío River, Chile”. *Obras y Proyectos* 14, 22-33.
- Vericat,D. y Batalla,R. J. (2004) “Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro”. *Rev. C. & G.*, 18 (1-2), 37-50.