



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES

“Análisis sistemático de las condiciones que controlan un hidrograma y su efecto sobre el esfuerzo de corte”

JAVIER FABIÁN MARTÍNEZ GONZÁLEZ

2020



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES

“Análisis sistemático de las condiciones que controlan un hidrograma y su efecto sobre el esfuerzo de corte”

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Profesor Guía : Dr. Angel Monsalve Sepúlveda

JAVIER FABIÁN MARTÍNEZ GONZÁLEZ

2020

**ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE LAS CONDICIONES QUE CONTROLAN UN
HIDROGRAMA Y SU EFECTO SOBRE EL ESFUERZO DE CORTE
JAVIER FABIÁN MARTÍNEZ GONZÁLEZ**

COMISIÓN EXAMINADORA

DR. ANGEL DARIO MONSALVE SEPÚLVEDA

Profesor guía

IVO FUSTOS

Académico Evaluador

MAXIMILIANO LIZANA

Académico Evaluador

Calificación trabajo escrito :

Calificación examen :

Calificación final :

*En memoria de mis padres, hermanos, abuelitos
y Mimi, los cuales con mucho amor me
enseñaron la importancia del esfuerzo y los
valores en la vida.*

Resumen

Cuando circula un cierto caudal por un río, el agua que está en contacto con las partículas del lecho produce un esfuerzo de corte, el cual, en términos generales, si supera al esfuerzo de corte crítico producirá la movilización de los granos que conforman el lecho. Este fenómeno es conocido como transporte de sedimentos.

En la práctica, generalmente se asume que el caudal de diseño es constante. Específicamente se suele utilizar el caudal *peak*, sin embargo, éste se presenta durante una fracción de tiempo del evento y no en su totalidad, por lo que la componente dinámica de un hidrograma es despreciada aun cuando se presenta de forma natural en la mayoría de los casos.

Es por este motivo que un método práctico que extienda la gama de aplicabilidad de las fórmulas convencionales para estimar el esfuerzo de corte en flujos variables en el tiempo y espacio se hace necesario. Su uso ayudaría a determinar y evaluar las condiciones de flujo que generan diferencias significativas en el esfuerzo de corte máximo y de esta forma, determinar las implicancias que tiene este análisis en el transporte de sedimentos.

El presente trabajo estudia el efecto de distintas formas de hidrograma en comparación a uno de caudal constante sobre el esfuerzo de corte. Esto se llevará a cabo mediante un modelo numérico unidimensional, el cual resuelve las ecuaciones de Saint Venant para obtener las características del flujo en el tiempo y en el espacio.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que las mayores diferencias en la relación del esfuerzo de corte máximo se obtuvieron con la variación de la topografía en el lecho y la variación de la rugosidad, caracterizada por medio del coeficiente de Manning.

Considerando las componentes dinámicas de un hidrograma, el efecto que su forma tiene en el transporte de sedimentos puede llegar a generar una diferencia de hasta un 18.4% en el esfuerzo de corte máximo. Aplicado al río Cautín, Temuco, esto es equivalente a diferencias de 21.2 toneladas en un día para partículas del tipo granular ya sea grava o arena.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivo General	3
1.3. Objetivos Específicos	3
Capítulo 2. Antecedentes Generales	5
2.1. Variables que afectan al flujo transiente sobre el esfuerzo de corte	5
2.1.1. Rugosidad del lecho	5
2.1.2. Pendiente	5
2.1.3. Variación del caudal en el tiempo	6
2.1.4. Longitud del tramo del río	7
2.2. Forma del hidrograma sobre el esfuerzo de corte	7
2.3. El esfuerzo de corte para su aplicación en la ingeniería Civil	9
Capítulo 3. Metodología del Trabajo	12
3.1. Determinación de Hidrogramas	13
3.2. Determinación del transporte de sedimentos	14
Capítulo 4. Resultados y Discusión	17
4.1. Efecto del $\partial Q/\partial t$ en el esfuerzo de corte	17
4.2. Efecto del coeficiente de rugosidad en el esfuerzo de corte	30
4.3. Efecto de la variación del caudal en el esfuerzo de corte	35
4.4. Efecto del largo en el esfuerzo de corte	38
4.5. Efecto de la variación topográfica del lecho en el esfuerzo de corte	46
4.6. Cuantificación y efecto del transporte de sedimento	51
Capítulo 5. Conclusiones	57
Nomenclatura	59
Bibliografía	60

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte.	17
Tabla 4.2. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del coeficiente de rugosidad en el esfuerzo de corte.	18
Tabla 4.3. Escenarios y su tiempo de simulación, caso Q.1.	22
Tabla 4.4. Escenarios y su tiempo de simulación, caso Q.2.	26
Tabla 4.5. Escenarios y su tiempo de simulación, caso Q.3.4.	30
Tabla 4.6. Valores Máximos del esfuerzo de corte para el caso 1.1	34
Tabla 4.7. Valores Máximos del esfuerzo de corte para el caso 1.2	34
Tabla 4.8. Valores Máximos del esfuerzo de corte para el caso 1.3	34
Tabla 4.9. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto de la variación del caudal sobre el esfuerzo de corte.	35
Tabla 4.10. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del largo en el esfuerzo de corte.	38
Tabla 4.11. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del largo en el esfuerzo de corte.	42
Tabla 4.12. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto de la variación en la topografía del lecho sobre el esfuerzo de corte.	46

Índice de Figuras

Figura 2.1. Clasificación Rosgen tipo I de los canales de acuerdo con su morfología.	6
Figura 2.2. Fotografía extracción de áridos río cautín, Temuco.	10
Figura 3.1. Distribución de cada hidrograma utilizado.	13
Figura 4.1. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el tiempo sobre el esfuerzo de corte caso Q.1.	18
Figura 4.2. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el doble del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.1.	19
Figura 4.3. Influencia del cambio de caudal variable y constante en la mitad del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.1.	20
Figura 4.4. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el cuarto del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.1.	21
Figura 4.5. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.	22
Figura 4.6. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el doble del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.	23
Figura 4.7. Influencia del cambio de caudal variable y constante en la mitad del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.	24
Figura 4.8. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el cuarto del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.	25
Figura 4.9. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el tiempo sobre el esfuerzo de corte caso Q.3.	26
Figura 4.10. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el doble del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.3.	27
Figura 4.11. Influencia del cambio de caudal variable y constante en la mitad del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.3.	28
Figura 4.12. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el cuarto del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.3.	29
Figura 4.13. Influencia del coeficiente de rugosidad en el flujo transiente sobre el esfuerzo de corte peak considerando hidrogramas con caudal cte y variables en el tiempo, caso 1.1.	31
Figura 4.14. Influencia del coeficiente de rugosidad en el flujo transiente sobre el esfuerzo de corte peak considerando hidrogramas con caudal cte y variables en el tiempo, caso 1.2.	32
Figura 4.15. Influencia del coeficiente de rugosidad en el flujo transiente sobre el esfuerzo de corte peak considerando hidrogramas con caudal cte y variables en el tiempo, caso 1.3.	33
Figura 4.16. Influencia de la variación del caudal en el esfuerzo de corte, caso $n=0.015$.	36
Figura 4.17. Influencia de la variación del caudal en el esfuerzo de corte, caso $n=0.055$.	37
Figura 4.18. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable de distribución normal.	39

Figura 4.19. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (+).	40
Figura 4.20. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (-).	41
Figura 4.21. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable de distribución normal.	43
Figura 4.22. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (+).	44
Figura 4.23. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (-).	45
Figura 4.24. Influencia del cambio de la variación espacial y el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso S.1.	47
Figura 4.25. Influencia del cambio de la variación espacial y el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso S.2.	48
Figura 4.26. Influencia del cambio de la variación espacial y el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso S.3.	50

CAPITULO 1
INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. Introducción

1.1. Descripción del problema

El caudal de un río varía dependiendo de diversos fenómenos. Por ejemplo, puede disminuir a raíz de extracciones de agua o experimentar una crecida debido a intensas precipitaciones o deshielos (Elosegi & Sabater, 2003). En general, la variación de caudal es un proceso que no se considera en la práctica aun cuando se presenta de forma natural en la mayoría de los casos. Al circular este caudal en el sentido del flujo experimenta un esfuerzo de corte en el lecho del río debido a la diferencia de velocidad entre el fondo y el cuerpo de agua. En términos generales, si este esfuerzo de corte supera al corte crítico de las partículas que están en contacto, se producirá la movilización de los granos del lecho lo que se conoce como transporte de sedimento (García, 2008).

Se han realizado amplios esfuerzos en el desarrollo de herramientas de modelación del transporte de sedimentos. Desde fórmulas empíricas simples, como por ejemplo las ecuaciones de Meyer-Peter and Müller, Yailin, Wilson, entre otras, hasta modelos numéricos tridimensionales, tales como MIKE3D, Delft3D, CURVIB (Khosronejad & Kang, 2011). Si bien, son más exactos, a su vez, son complejos en términos de datos de entrada y de costos computacionales muy elevados, por lo que, muchas veces se hace inviable su utilización (García, 2008). Por otro lado, en la práctica de ingeniería se suele utilizar el caudal peak como caudal de diseño, sin embargo, este se presenta durante una fracción del tiempo del evento y no en su totalidad y la componente dinámica de un hidrograma son despreciadas.

Por lo anterior, un método práctico que extienda la gama de aplicabilidad de las fórmulas convencionales para estimar el esfuerzo de corte sobre el lecho que considere flujos variables es necesario.

La importancia de este tema en la ingeniería es que permite una adecuada estimación de los esfuerzos máximos a los que están sometidos tanto el lecho como las obras que sobre él yacen y, por lo tanto, proporciona una herramienta para el desarrollo de diseños confiables y seguros. Esta herramienta es de vital importancia en el estudio del transporte de sedimentos, actividades de extracción de material del cauce de los ríos, proyectos que requieran cálculos de socavación o cada obra que tenga contacto con agua de un río, entre otras.

El presente trabajo de investigación se estructura en cinco capítulos. El presente capítulo expone la descripción del problema y por qué se hace necesario su estudio y análisis. En el capítulo 2, se presentan una recopilación de antecedentes referentes al estudio y el desarrollo de métodos numéricos para la resolución de ecuaciones del flujo uniforme en cauces abiertos y así estimar el esfuerzo de corte. En el capítulo 3, se presenta la metodología del trabajo encomendado, analizando las variables que afectan al flujo transiente, en particular la rugosidad, pendiente del lecho, variación de caudal en el tiempo (forma del hidrograma) y la longitud del tramo del río. De esta manera se cuantificará el efecto que tienen sobre el esfuerzo de corte, de manera tal de examinar su implicancia en el transporte de sedimentos. Para este fin se utilizará un modelo numérico de flujo unidimensional basado en las ecuaciones de Saint Venant, las cuales describen el régimen variable en cauce abierto para una dimensión de análisis, derivadas de la conservación de la masa y la continuidad del movimiento mediante el método de volúmenes finitos unificado en un código existente desarrollado en el software MATLAB para la simulación numérica del flujo. En el capítulo 4, se exponen los resultados obtenidos con su correspondiente análisis y finalmente en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y las posibles líneas de desarrollo de esta memoria de título.

1.2. Objetivo General

Realizar un análisis sistemático de los efectos que tienen las variables que afectan al flujo transiente sobre el esfuerzo de corte en el lecho de un río.

1.3. Objetivos Específicos

- Determinar de las condiciones de flujo que generan diferencias significativas en el esfuerzo de corte máximo considerando un caudal constante o variable en el tiempo.
- Cuantificar el efecto de un hidrograma en el transporte de sedimento y su aplicación en la ingeniería civil.

CAPITULO 2
ANTECEDENTES GENERALES

Capítulo 2. Antecedentes Generales

2.1. Variables que afectan al flujo transiente sobre el esfuerzo de corte

La buena estimación de las variables que afectan al flujo transiente, las cuales depende del espacio y tiempo es de gran importancia a la hora de una adecuada determinación del esfuerzo de corte (Bhuban Ghimire & Zhi-Qiang Deng, 2011). En función de conocer los antecedentes teóricos, se describen a continuación cada una de variables que serán analizadas y que afectan al flujo uniforme de un canal abierto con fluido newtoniano de ancho constante.

2.1.1. Rugosidad del lecho

La rugosidad del lecho en la práctica de ingeniería se suele ocupar usando el coeficiente de Manning. Esta variable nos da un parámetro para estimar la resistencia al flujo en un canal determinado, el cual depende de un cierto número de factores que involucran la rugosidad superficial, vegetación, geometría del canal, condiciones del flujo, tamaño de las partículas, entre otros (Swan y Horton, 1905).

Como el presente trabajo incluye el estudio de canales abiertos con lecho de grava sin vegetación, de flujo uniforme con partículas de diámetro medio mayores a 2 mm, se considerarán utilizar valores de coeficiente de Manning iguales a 0.015, 0.030 y 0.040 para las simulaciones (Chow, 2004).

2.1.2. Pendiente

Para que el agua se mueva en un sistema de superficie libre se requiere de una cierta inclinación para que este fluya por la acción de fuerzas como su peso, presión atmosférica u factores externos (Bravard y Petit, 2009).

En el presente trabajo se considerará modelar un canal prismático, es decir, con sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante. Sin embargo, más adelante se analizará el efecto de cambios locales en la pendiente.

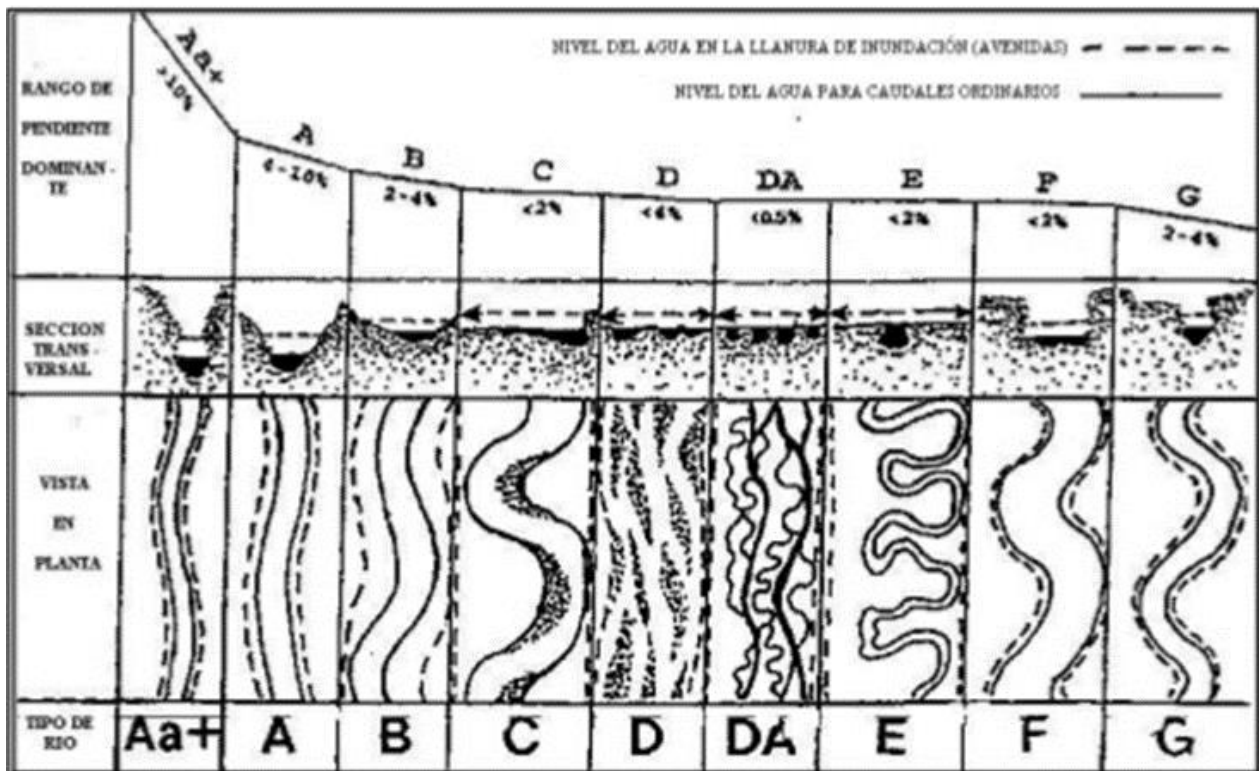


Figura 2.1. Clasificación Rosgen tipo I de los canales de acuerdo con su morfología.

En función de la clasificación morfológica de la sección transversal y en planta de la Figura 2.1, se considerará un canal tipo C de acuerdo con la clasificación tipo I de Rosgen y se establece como valor de pendiente promedio de 0.9% fija para las simulaciones correspondientes.

2.1.3. Variación del caudal en el tiempo

El caudal representa la cantidad de fluido o volumen que fluye a través de una sección transversal en el tiempo. En términos generales la variación del caudal no es algo que se considere en la práctica, aun así, se presenta de forma general en la mayoría de los casos. Normalmente se utiliza el caudal máximo como caudal de diseño, y debido a esto es que en el presente trabajo se analizarán las diferencias y el efecto de la variación del caudal en el tiempo frente a considerar la utilización de un caudal constante.

En el presente estudio, el caudal inicial se definió con el valor de $0.132 \text{ m}^3/\text{s}$, debido a que este caudal teóricamente es capaz de movilizar partículas pequeñas de grava considerando un diámetro mínimo de 15 milímetros para un canal de pendiente fija de 0.9%. Asimismo, el caudal final se

definió con el valor de $0.196 \text{ m}^3/\text{s}$, de manera tal de movilizar partículas granulares pequeñas con un tamaño mínimo de 18 milímetros.

2.1.4. Longitud del tramo del río

En la práctica se suele usar el concepto de flujo uniforme, es decir, asume que las características son homogéneas en el espacio (Sotelo Ávila, 2002). Por lo tanto, el largo que se define en el estudio es fijo. Por ejemplo, en estudio de extracción de áridos se suele recomendar 100 metros aguas arriba y 100 metros aguas abajo, pero esta longitud 100 metros pareciera ser totalmente arbitraria ya que cuando se utilizan hidrogramas o variables que cambian en el tiempo, distintos resultados se podrían obtener dependiendo de la definición del largo del río.

Por lo general se busca que la longitud del tramo del río sea aproximadamente 10 veces el ancho. En este estudio se analizará un largo de 8 metros. El largo con que se trabaja en los modelos numéricos es en realidad mayor (promedio 13 metros), sin embargo, se descarta en el análisis las secciones de aguas arriba y abajo para descartar la influencia de las condiciones de borde en los resultados.

2.2. Forma del hidrograma sobre el esfuerzo de corte

Cuando circula un caudal de un río en el sentido del flujo, experimenta un esfuerzo de corte en el lecho del río debido a la diferencia de velocidad entre el fondo y el cuerpo de agua. La evaluación precisa del esfuerzo de corte en el lecho es altamente importante a la hora de calcular el transporte de sedimentos, como, por ejemplo, por medio de ecuaciones empíricas como la de Meyer Peter Müller, utilizada en canales con lecho de grava o arena (García, 2008).

Estimar el esfuerzo de corte durante flujos transientes es una tarea relativamente difícil puesto que normalmente implica una modelación numérica que requiere de datos detallados de flujo y geometría (Bhuban Ghimire y Zhi-Qiang Deng, 2011). Es por esta razón que todavía se utilizan métodos basados en un flujo uniforme constante, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$u_* = \sqrt{g * R_h * S_f} \quad (2.1)$$

Para flujos de canales abiertos transiente, la pendiente de fricción es esencial para estimar la velocidad de corte y el enfoque más adecuado consiste en resolver las ecuaciones de Saint Venant, derivadas de la conservación de la masa y continuidad del movimiento (Bhuban Ghimire y Zhi-Qiang Deng, 2013). En este estudio, se utiliza un modelo numérico para determinar cada una de las variables que controlan la pendiente de energía. Esta se expresa como S_f (Mrokowska *et al.*, 2015), de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$S_f = S_0 - \frac{\delta h}{\delta x} - \frac{U}{g} \frac{\delta U}{\delta x} - \frac{1}{g} \frac{\delta U}{\delta t} \quad (2.2)$$

De forma simplificada.

$$S_f = S_0 - S_1 - S_2 - S_3 \quad (2.3)$$

Donde S_1 contempla el cambio de profundidad en el tramo, S_2 el cambio de velocidad en el tramo y S_3 el cambio de velocidad en el tiempo. Combinando la *ecuación (2.1)* con la *ecuación (2.3)*, para un flujo transiente unidimensional en canales abiertos, se tiene:

$$u_* = \sqrt{g * R_h * (S_0 - S_1 - S_2 - S_3)} \quad (2.4)$$

El esfuerzo de corte en el lecho se puede representar como (Mrokowska *et al.*, 2015):

$$\tau = \rho * u_*^2 \quad (2.5)$$

Finalmente combinando la *ecuación (2.4)* con la *ecuación (2.5)*, se obtiene la fórmula del cálculo del esfuerzo de corte para un flujo transiente unidimensional en canales abiertos denotada por τ (Pa):

$$\tau = \rho * g * R_h * (S_0 - S_1 - S_2 - S_3) \quad (2.6)$$

De ello se deduce que, dependiendo de si el caudal está aumentando o disminuyendo, la pendiente de fricción o la tensión de corte del lecho en cualquier momento es mayor o menor que en condiciones normales de flujo (Bhuban Ghimire y Zhi-Qiang Deng, 2013), en donde en la práctica, suele despreciarse la componente dinámica del hidrograma.

La principal ventaja de este método es que es fácil de usar y entrega resultados más precisos cuando se aplica a ríos de canal abierto con flujo unidimensional, además mediante el presente modelo se puede analizar cada componente que depende de la variación del espacio y tiempo por separado si es requerido.

2.3. El esfuerzo de corte para su aplicación en la ingeniería Civil

El transporte de sedimentos en ríos requiere de una evaluación de la dinámica del movimiento de las partículas debido a las fuerzas de arrastre de un fluido. Este tipo de estudio permite evaluar si en el tramo del río ocurre deposición o erosión y determinar los volúmenes u cantidad de masa de las partículas que son arrastradas u depositadas (Rubio, 2011).

Los efectos de una extracción de material, típicamente usados para obtener agregados para la construcción de infraestructuras, se pueden incorporar dentro del estudio para cuantificar el impacto que estas actividades tendrán dentro del río (Silva Araya y Rivera Santos, 2016).

La cuantificación de los cambios en el nivel del lecho de un cauce que ocasiona o produjo las actividades de extracción requiere del uso de un modelo hidráulico para determinar el esfuerzo cortante. A partir de esto y utilizando ecuaciones de transporte de sedimentos, se pueda estimar la cantidad volumétrica o de masa por unidad de tiempo de sedimentos transportados por el flujo. Con tal conocimiento es posible evitar la extracción excesiva. Es decir, evitar alterar el delicado equilibrio entre el sedimento que el río provee y el que se extrae (Silva Araya y Rivera Santos, 2016).



Figura 2.2. Fotografía extracción de áridos río cautín, Temuco.

Finalmente, en función de lo anteriormente descrito se cuantificarán las diferencias más amplias obtenidas al considerar la componente dinámica de un hidrograma sobre el esfuerzo de corte en comparación con un hidrograma que considera un caudal constante. Los resultados obtenidos se relacionarán con caso real, para cuantificar de una manera aproximada el volumen o cantidad de masa de sedimento transportado que se desestima al no considerar el flujo transiente.

CAPITULO 3
METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Capítulo 3. Metodología del Trabajo

Con el objetivo de llevar a cabo la investigación descrita anteriormente, se detallan las etapas de la metodología y materiales a utilizar para cumplir adecuadamente con los objetivos propuestos.

Para realizar el análisis sistemático de las variables que intervienen en un flujo transiente para canales abiertos como lo es un río, se utilizará un modelo desarrollado en Matlab, el cual resuelve las ecuaciones de Saint Venant. Este está basado en el método de volúmenes finitos y se utiliza para flujos unidimensionales con alta variabilidad temporal y espacial. El presente método a diferencia del método de elementos finitos conserva la masa local y global junto con la conservación de momento, de este modo da la flexibilidad total de realizar cualquier variación analítica que se requiera. Consecuentemente, el impacto por cantidad de masa perdida ya sea por infiltración o evaporación, que, si bien tienen implicancias mínimas en la práctica, no serán analizados en el presente estudio.

Este modelo ha sido analizado y comprobado anteriormente con éxito, teniendo muy buena precisión el cual combina dos de los esquemas más difundidos en el campo de métodos numéricos proveniente de enfoques distintos, como el esquema de Van Leer a partir del desarrollo del método *flux difference splitting* y el esquema de Vijayasundaram a partir del desarrollo del método *flux splitting* (Donoso, 2007). El modelo ha sido evaluado en función del error porcentual promedio considerando estos esquemas por separado, teniendo resultados eficientes capaces de considerar un lecho parcialmente seco a través de cinco pruebas de referencia con solución exacta conocida, tales como:

1. Flujo en un canal rugoso de sección transversal rectangular
2. Rotura instantánea sobre un lecho horizontal inicialmente seco
3. Flujo subcrítico sobre un bache
4. Flujo subcrítico sobre un bache con cambio al flujo supercrítico
5. Flujo supercrítico sobre un bache con salto hidráulico

Los errores porcentuales medios de los cálculos oscilaron entre 0.0% y 5.4% para la profundidad de flujo y 0.0% y 6.3% para descargas específicas (Link y Donoso, 2008). De este modo, el modelo utilizado es apropiado para el tipo de estudio que se desarrolla en este trabajo de titulación.

3.1. Determinación de Hidrogramas

Se utilizarán tres hidrogramas distintos, los cuales tienen como característica en común que todos contemplan la misma cantidad o volumen de agua en la duración total del evento, pero difieren en su forma.

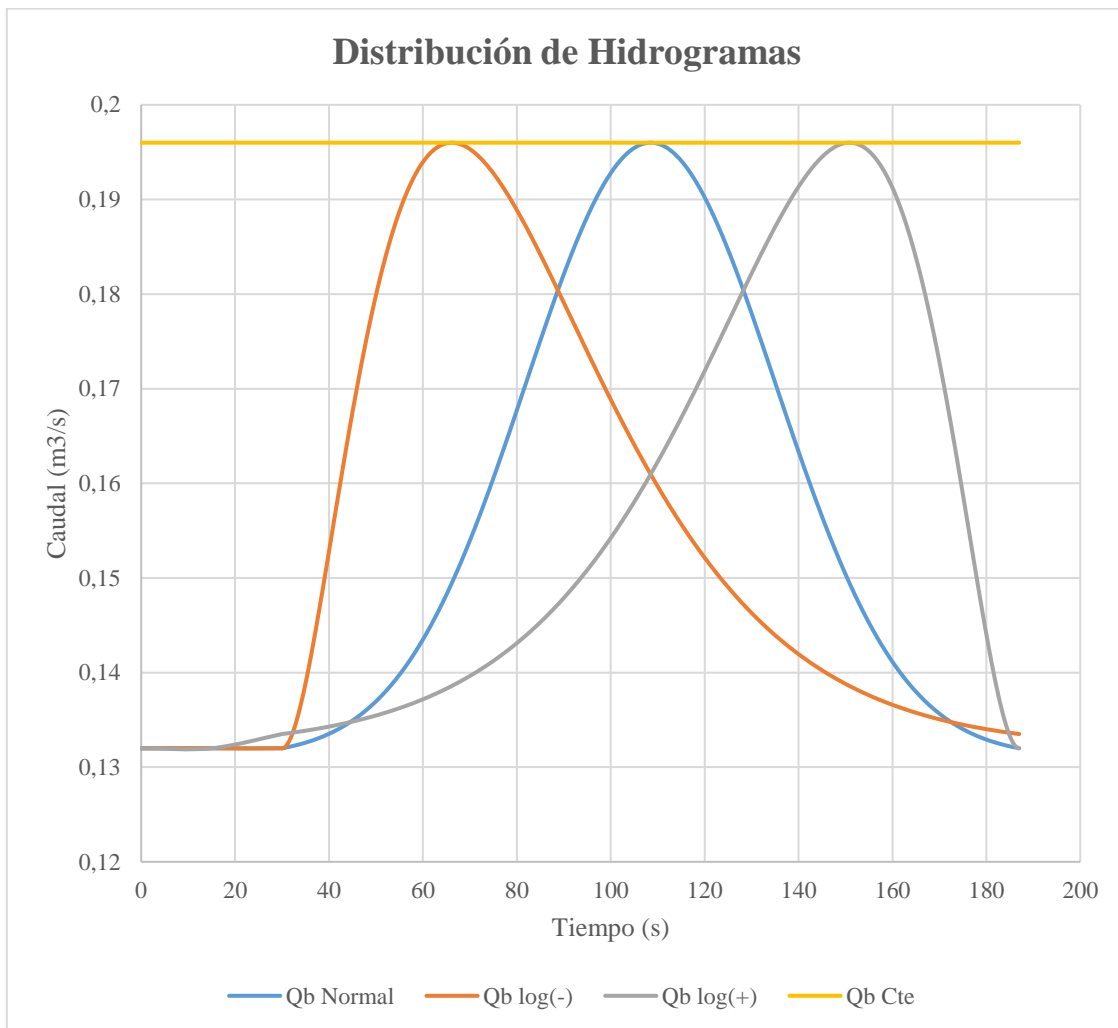


Figura 3.1. Distribución de cada hidrograma utilizado.

Como se puede apreciar en la Figura 3.1, se consideró un hidrograma simétrico definido por una función de distribución normal y dos de función log normal donde uno es el reflejo del otro. Uno de ellos tiene un aumento fuerte del caudal al inicio del hidrograma y un descenso suave hacia el

final y se denomina log (-) y el otro de manera contraria, inicia un aumento de caudal de manera suave y desciende de manera abrupta al final y se denomina log (+).

A su vez, se encuentra el hidrograma de caudal constante, que nos entregará un parámetro para medir las diferencias significativas que se encuentren en su valor peak dependiendo de la utilización de cada hidrograma en particular.

En virtud de la eficacia de este método práctico, la presente metodología de este trabajo de título consistirá en analizar sistemáticamente las variables que intervienen en el flujo transiente de un río unidimensional de ancho constante, en particular las condiciones iniciales y de borde que dependen del espacio y tiempo, tales como el coeficiente de Manning (n), pendiente (S), variación de caudal en el tiempo ($\partial Q/\partial t$) y longitud del tramo del río (L) de forma independiente. Este análisis será llevado a cabo con la modelación numérica anteriormente descrita.

Se procesarán los resultados del modelo para luego interpretar y analizar sistemáticamente la importancia de cada variable que afecta a un hidrograma sobre el esfuerzo de corte. Se analizarán las diferencias e implicancias que tienen en el transporte de sedimentos, si se considera un hidrograma con un caudal constante frente a un hidrograma de caudal variable. Finalmente, se elaborará un resumen de resultados con sus posteriores conclusiones y recomendaciones de acuerdo con los objetivos propuestos.

3.2. Determinación del transporte de sedimentos

Es posible calcular la masa o el volumen de sedimentos que se transporta en un instante de tiempo para un río de longitud dada, mediante la ecuación de Meyer-Peter y Müller. Esta es válida para evaluar el transporte de sedimentos en el lecho cuando el material es granular, ya sea grava o arena, de forma uniforme y se expresa con las siguientes fórmulas (R.J. Garde, 1995):

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w) * g * S} \quad (3.1)$$

En donde una vez calculado, se utiliza la siguiente fórmula adimensional para la descarga volumétrica de sedimentos por unidad de ancho.

$$q_s^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (3.2)$$

En donde el valor del esfuerzo de corte crítico, determinado experimentalmente para partículas granulares transportadas en el lecho de un canal es de 0.047. El cálculo del caudal de sedimento transportado por metro lineal, se calcula mediante la ecuación.

$$q_s = q_s^* * \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g D_{50}^3} \quad (3.3)$$

El diámetro medio de sedimento utilizado en el presente trabajo será definido con el valor igual o mayor a 2 mm. Luego, para calcular el caudal de sedimento transportado por unidad de ancho del tramo del río, se utiliza la siguiente ecuación.

$$Q_s = q_s * B \quad (3.4)$$

Finalmente, el volumen de sedimento transportado para un instante de tiempo queda definido como:

$$V = Q_s * t \quad (3.5)$$

O bien, si se desea conocer la masa de este sedimento transportado, se utiliza la siguiente ecuación:

$$masa = V * \rho_s \quad (3.6)$$

Esta metodología finalmente facilitará la obtención del volumen o masa de sedimento que se transporta en un tramo del lecho de un canal y en un período de tiempo determinado, mediante la *ecuación (3.5)* y *ecuación (3.6)* respectivamente.

CAPITULO 4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Capítulo 4. Resultados y Discusión

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos de acuerdo con las diversas simulaciones realizadas. De esta manera el efecto e importancia de cada una de las variables que intervienen en el flujo transiente para distintos hidrogramas, considerando un caudal variable y constante en el tiempo en función de los objetivos propuestos es analizado.

4.1 Efecto del $\partial Q/\partial t$ en el esfuerzo de corte

Se analizó el efecto del cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte para un canal de las siguientes características:

Tabla 4.1. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte.

Caso [#]	Pendiente [m/m]	Coef. Manning []	Longitud [m]	Q inicial [m3/s]	Q final [m3/s]
Q.1	0.009	0.015	8	0.132	0.196
Q.2	0.009	0.030	8	0.132	0.196
Q.3	0.009	0.040	8	0.132	0.196

Se mantuvo la pendiente, coeficiente de rugosidad y longitud fijas modificando solamente el cambio de caudal en el tiempo, considerando el doble, la mitad y el cuarto del tiempo original propuesto de simulación. Se consideró los tres hidrogramas que incluyen un caudal variable en el tiempo y un hidrograma que considera un caudal constante en el tiempo. Con esto se puede analizar la diferencia que existe en el valor del esfuerzo de corte máximo si se considera un hidrograma de caudal constante frente a cada hidrograma de caudal variable en el tiempo de manera independiente. A continuación, se detallan los escenarios correspondientes al caso Q.1 de la Tabla 4.1.

Tabla 4.2. Escenarios y su tiempo de simulación, caso Q.1.

Caso [#]	Tiempo Simulación [s]	Tiempo Propuesto []
Q.1.1	187	Original
Q.1.2	374	Doble
Q.1.3	93.5	Mitad
Q.1.4	47	Cuarto

Se inicia con los análisis y resultados correspondientes a los escenarios de la Tabla 4.2, tal cómo se detalla a continuación.

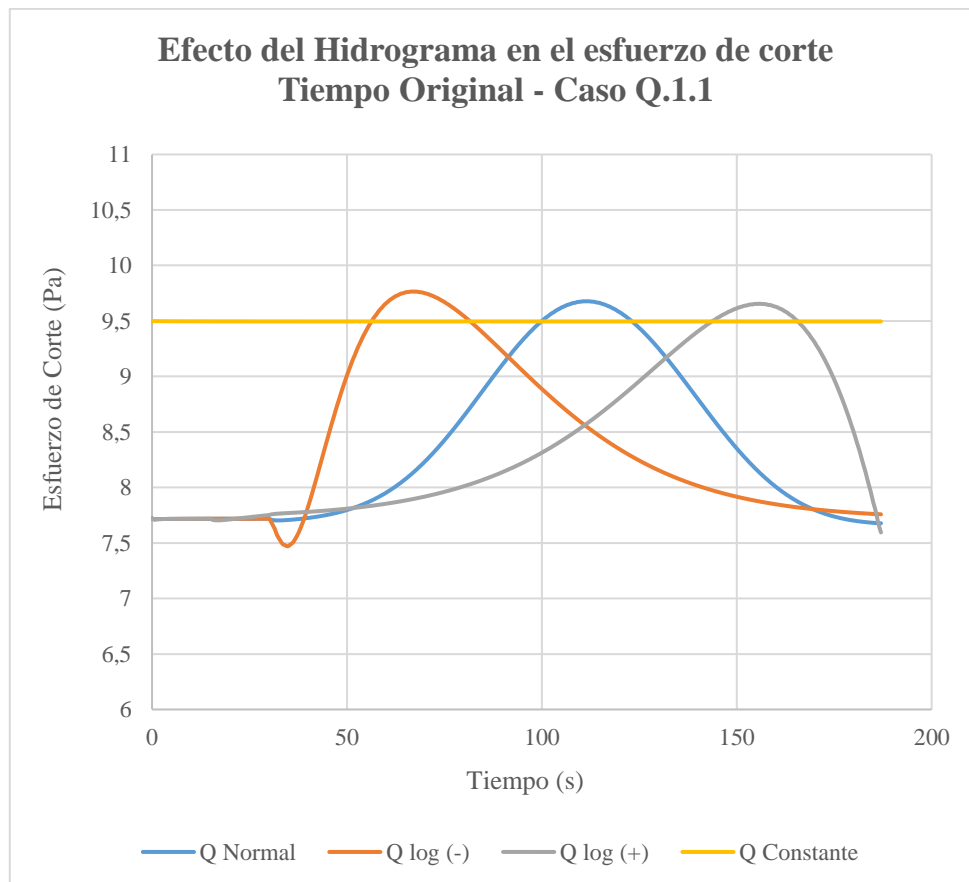


Figura 4.1. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el tiempo sobre el esfuerzo de corte caso Q.1.1

El tiempo original total de simulación para cada hidrograma correspondió a 187 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.1, las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudal variable en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 2.8% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (-), 1.9% para el hidrograma de distribución normal y 1.6% en su diferencia más acotada para el hidrograma log (+).

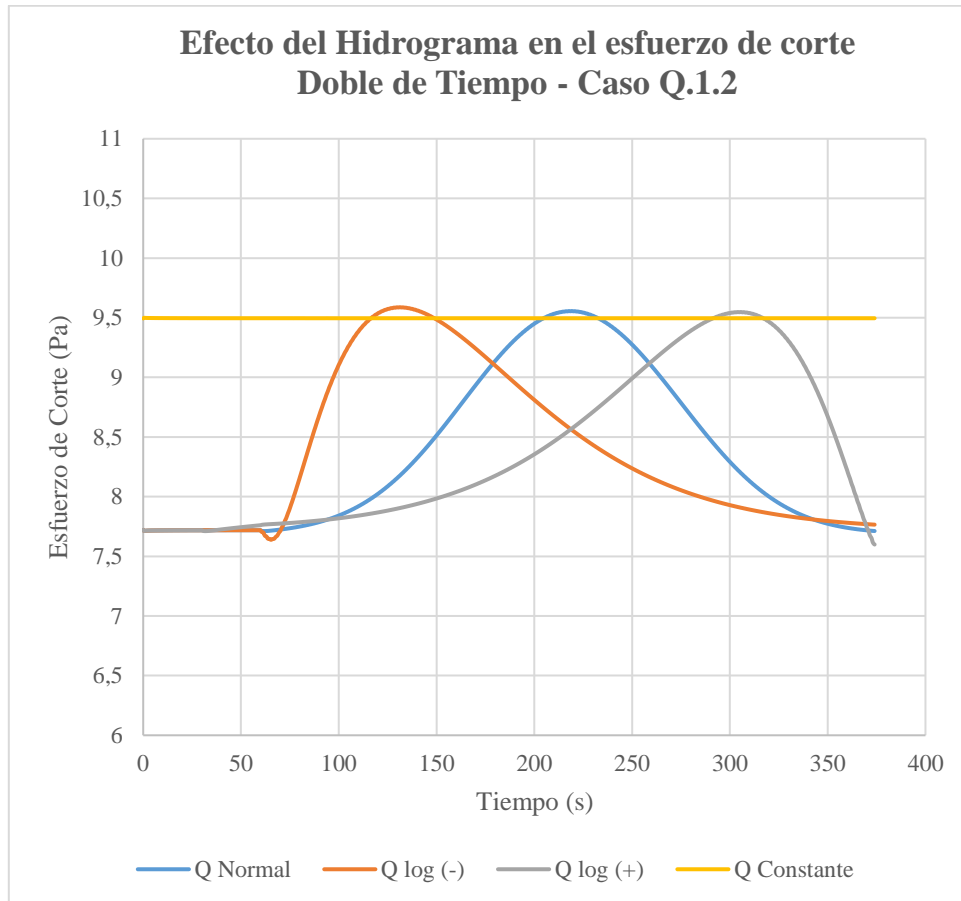


Figura 4.2. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el doble del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.1.2

Para el doble del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma correspondió a un total de 374 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.2, para el tiempo ejecutado de la simulación, las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudal variable en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es igual al valor de 0.9% en su diferencia más abultada para el

hidrograma log (-), 0.6% para el hidrograma de distribución normal y 0.5% en su diferencia más acotada para el hidrograma log (+).

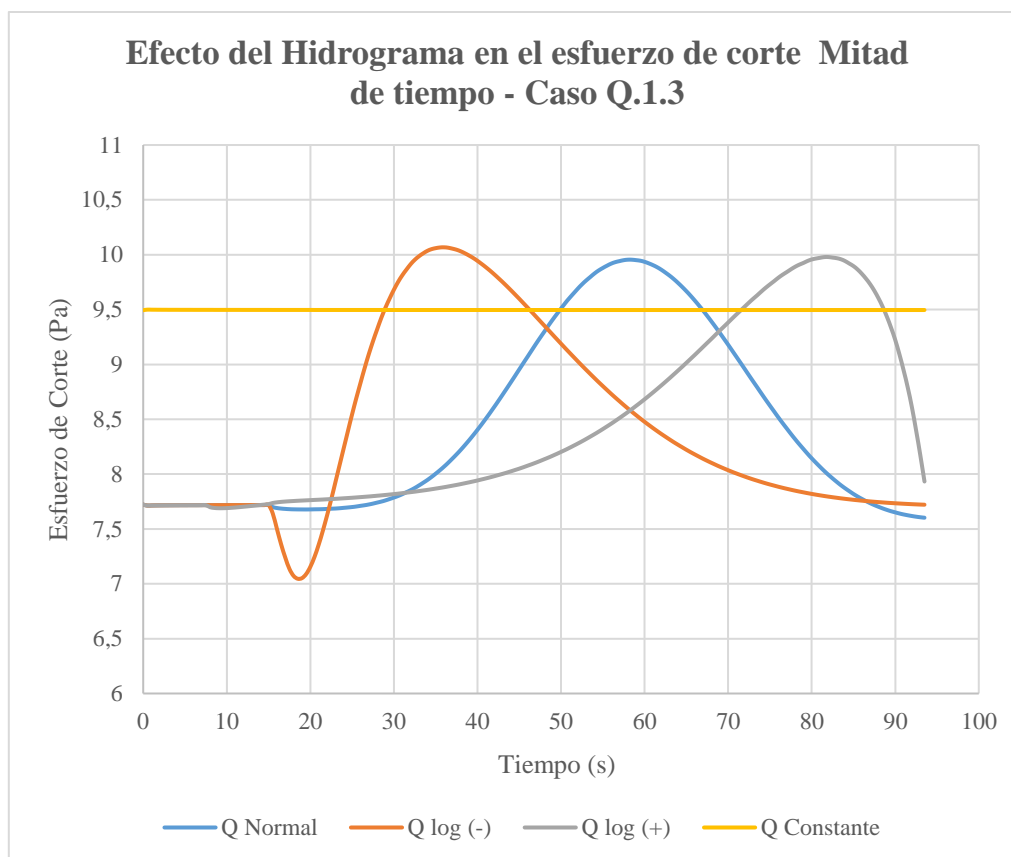


Figura 4.3. Influencia del cambio de caudal variable y constante en la mitad del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.1.3

Para la mitad del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma correspondió a un total de 93.5 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.3, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudal variable en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es igual al valor de 6.0% en su mayor diferencia para el hidrograma log (-), 4.8% para el hidrograma log (+) y 5.0% en su diferencia más acotada para el hidrograma de distribución normal.

Se puede apreciar también un efecto inverso, en donde el esfuerzo de corte disminuye abultadamente de manera inicial en un 8.8% frente a su valor inicial y luego experimenta un

incremento hasta llegar a su valor máximo en un período de 18 segundos, correspondiente al 19.3% del tiempo total de la simulación para el caso del hidrograma log (-).

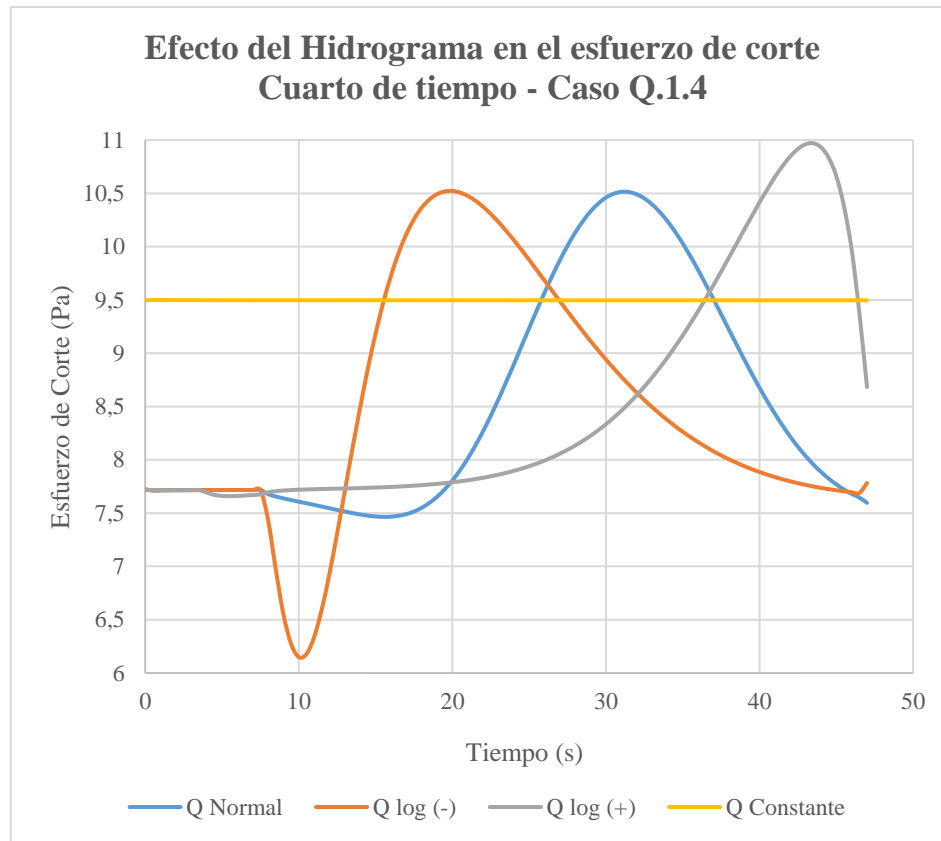


Figura 4.4. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el cuarto del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.1.4

Para el cuarto del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma correspondió a un total de 47 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.4, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 15.5% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (+), 10.8% para el hidrograma log (-) y 10.7% en su diferencia más acotada para el hidrograma de distribución normal. Se puede apreciar también un efecto inverso, en donde el esfuerzo de corte disminuye abultadamente de manera inicial en un 20.4% frente a su valor inicial y luego experimenta un alza hasta llegar a su valor máximo en un período de 10 segundos, correspondiente al 21.3% del tiempo total de la simulación para el caso de hidrograma log (-).

A continuación, se realizan de la misma manera los análisis y resultados para el caso Q.2 de la Tabla 4.1 y se muestran los escenarios considerados en la siguiente Tabla.

Tabla 4.3. Escenarios y su tiempo de simulación, caso Q.2.

Caso [#]	Tiempo Simulación [s]	Tiempo Propuesto []
Q.2.1	187	Original
Q.2.2	374	Doble
Q.2.3	93.5	Mitad
Q.2.4	47	Cuarto

Se aumenta al doble el coeficiente de Manning de valor igual a 0.030 y se mantienen las demás condiciones iniciales y de borde fijas para los distintos hidrogramas, y en función de los escenarios de la Tabla 4.3, como se muestran en las siguientes Figuras:

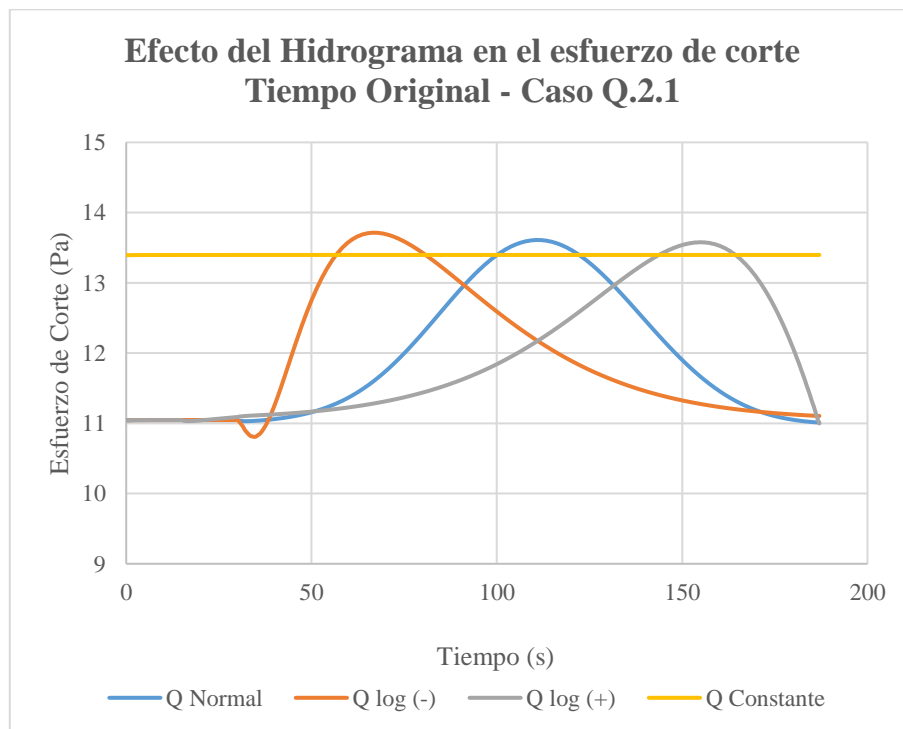


Figura 4.5. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.1.

El tiempo original total de simulación para cada hidrograma correspondió a 187 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.5, para el tiempo ejecutado de simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo frente a un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 2.4% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (-), 1.6% para el hidrograma de distribución normal y 1.3% en su diferencia más acotada para el hidrograma log (+).

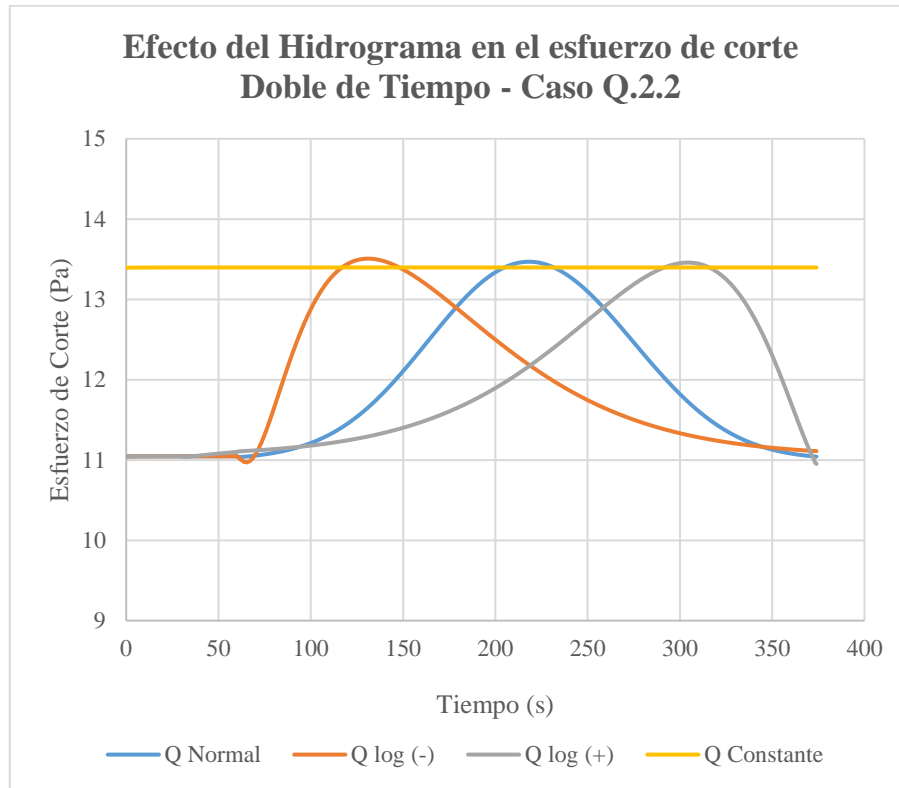


Figura 4.6. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el doble del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.2.

Para el doble del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma correspondió a un total de 374 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.6, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 0.8% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (-), 0.5% para el hidrograma de distribución normal y 0.4% en su diferencia más acotada para el hidrograma log (+).

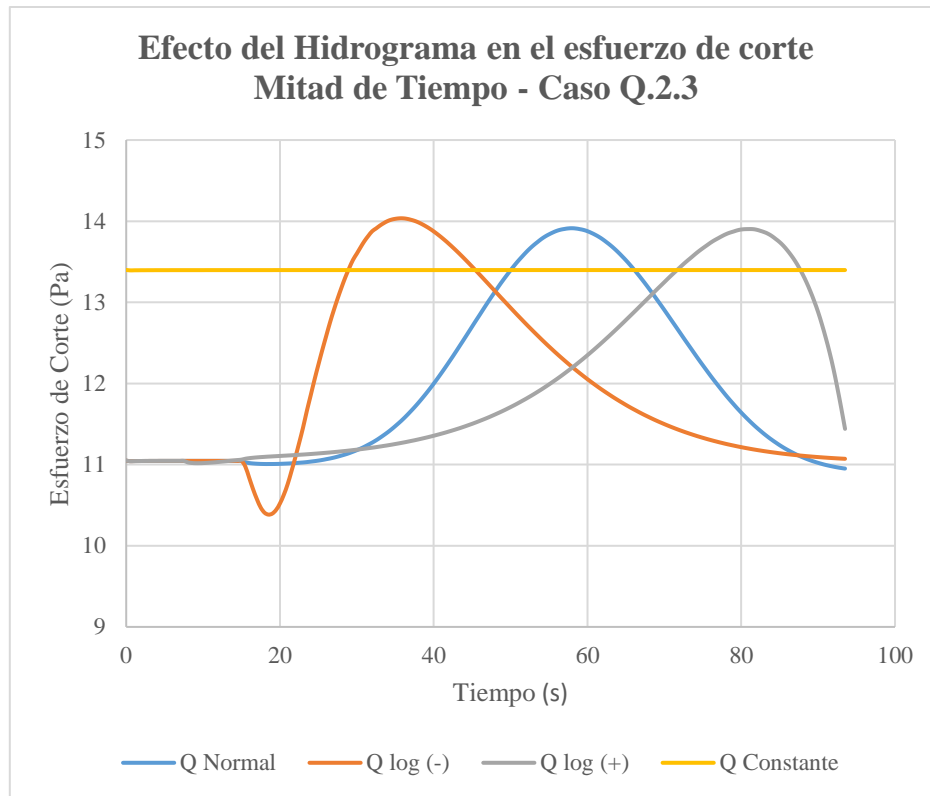


Figura 4.7. Influencia del cambio de caudal variable y constante en la mitad del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.3.

Para la mitad del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma, correspondió a un total de 93.5 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.7, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 4.8% para el hidrograma log (-) y 4.7% para el hidrograma log (+) y para el hidrograma de distribución normal.

Se puede el mismo efecto, en donde el esfuerzo de corte disminuye inicialmente en un 6.0% frente a su valor inicial y luego experimenta un alza hasta llegar a su valor máximo en un período de 18 segundos, correspondiente al 19.3% del tiempo total de la simulación para el caso de hidrograma log (-). Esto se debe a este hidrograma aumenta rápidamente al inicio su caudal y a su vez, este efecto se produce cuando se aumenta el cambio de caudal en el tiempo, por lo que las componentes que contemplan la velocidad en sus términos aumentan su valor y al estar precedidas por un valor negativo según la ecuación (2.3), se produce la disminución del esfuerzo de corte hasta estabilizarse al término del hidrograma.

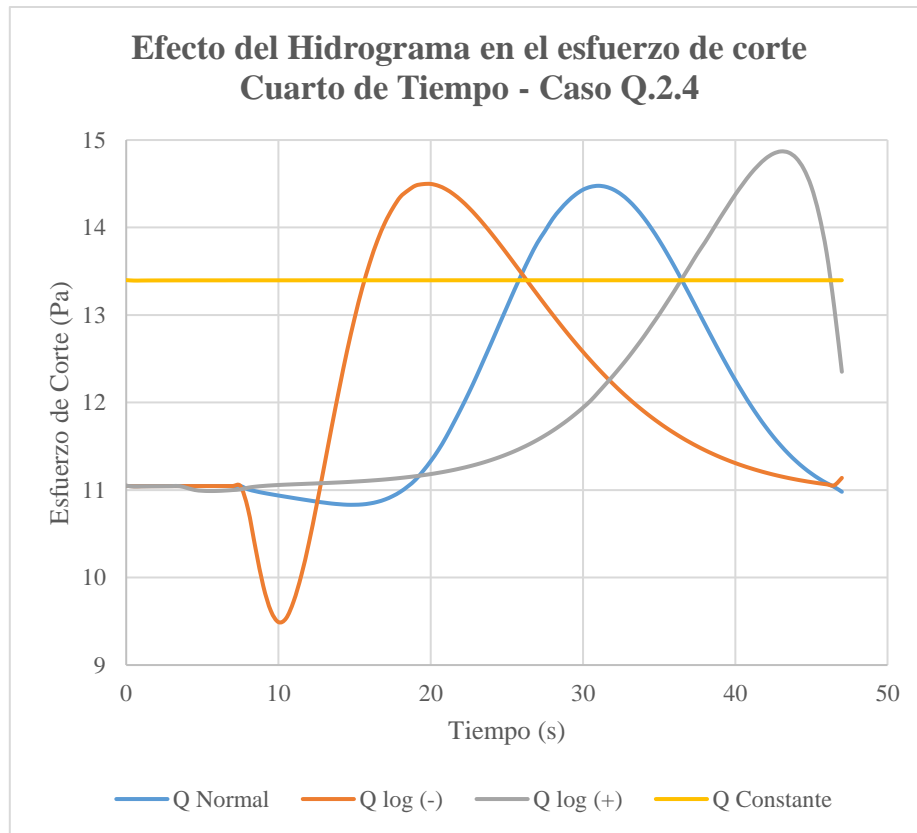


Figura 4.8. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el cuarto del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.2.4.

Para el cuarto del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma, correspondió a un total de 47 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.8, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 11.0% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (+), 8.2% para el hidrograma log (-) y 8.0% en su diferencia más acotada para el hidrograma de distribución normal.

Se puede apreciar también un efecto inverso, en donde el esfuerzo de corte disminuye abultadamente de manera inicial en un 14.1% frente a su valor inicial y luego experimenta un alza hasta llegar a su valor máximo en un período de 10 segundos, correspondiente al 21.3% del tiempo total de la simulación para el caso de hidrograma log (-).

Finalmente, se realizan de la misma manera los análisis y resultados para el caso Q.3 de la Tabla 4.1 y se muestran los escenarios considerados en la siguiente Tabla.

Tabla 4.4. Escenarios y su tiempo de simulación, caso Q.3.

Caso [#]	Tiempo Simulación [s]	Tiempo Propuesto []
Q.3.1	187	Original
Q.3.2	374	Doble
Q.3.3	93.5	Mitad
Q.3.4	47	Cuarto

Se un aumento del coeficiente de Manning de valor igual a 0.040. Se mantienen las demás condiciones iniciales y de borde fijas para los distintos hidrogramas. En función de los escenarios de la Tabla 4.4, como se muestra a continuación.

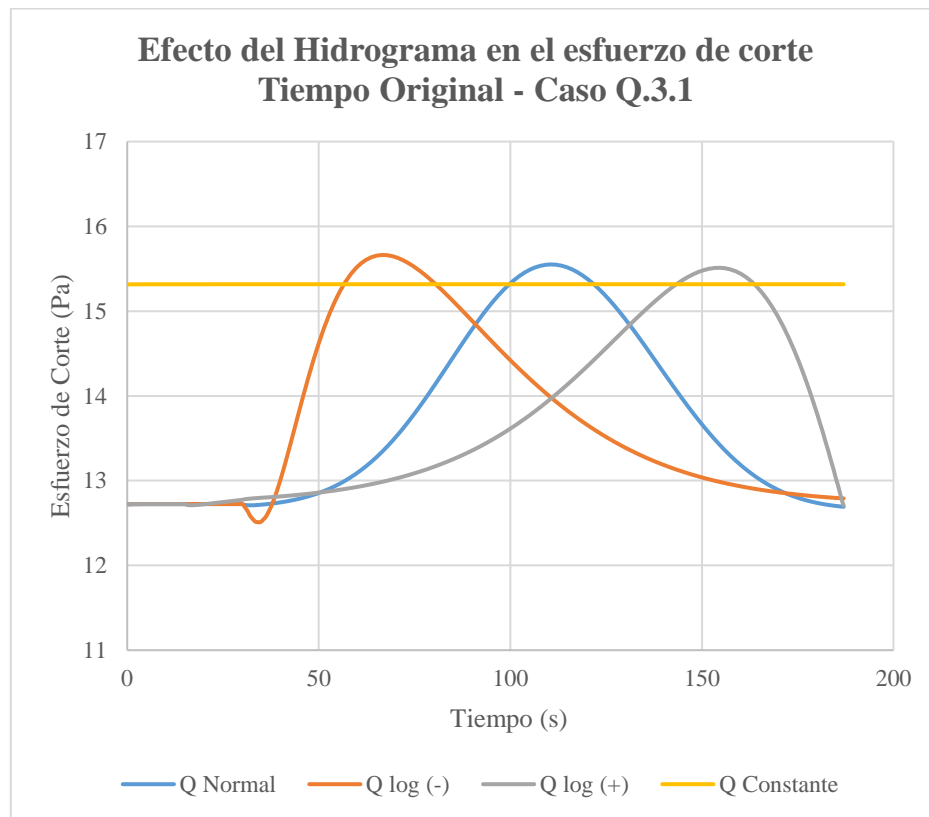


Figura 4.9. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.3.

El tiempo original de simulación para cada hidrograma correspondió a 187 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.9, para el tiempo ejecutado las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 2.2% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (-), 1.5% para el hidrograma de distribución normal y 1.3% en su diferencia más acotada para el hidrograma log (+).

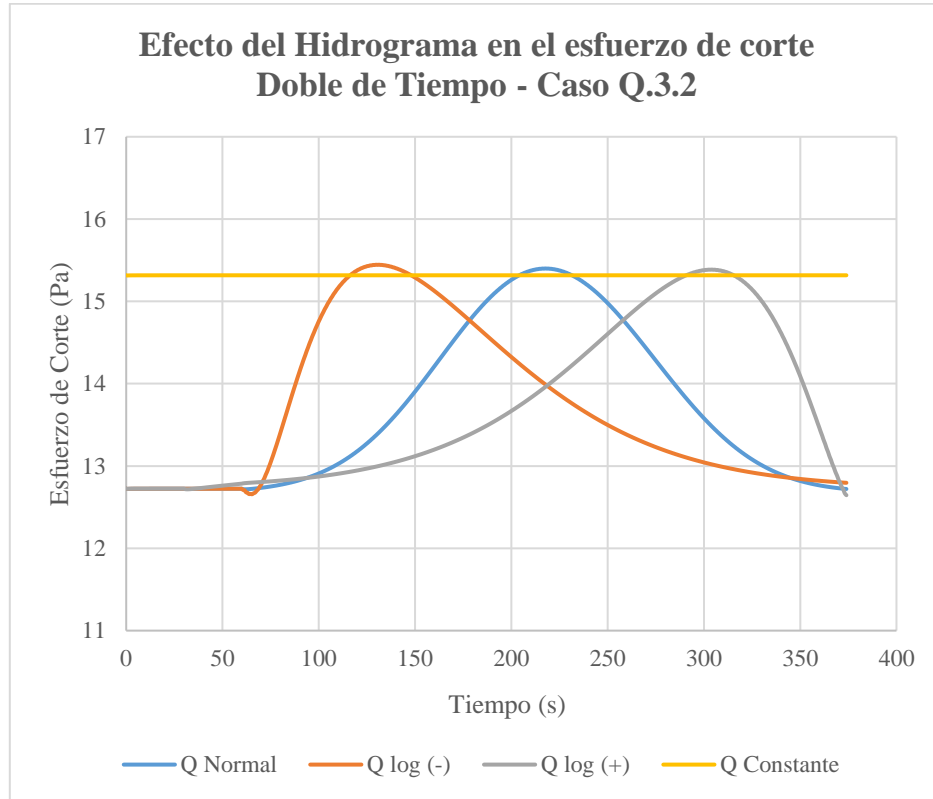


Figura 4.10. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el doble del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.3.

Para el doble del tiempo propuesto de simulación para cada hidrograma correspondió a un total de 374 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.10, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 0.8% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (-), 0.5% para el hidrograma de distribución normal y 0.4% en su diferencia más acotada para el hidrograma log (+).

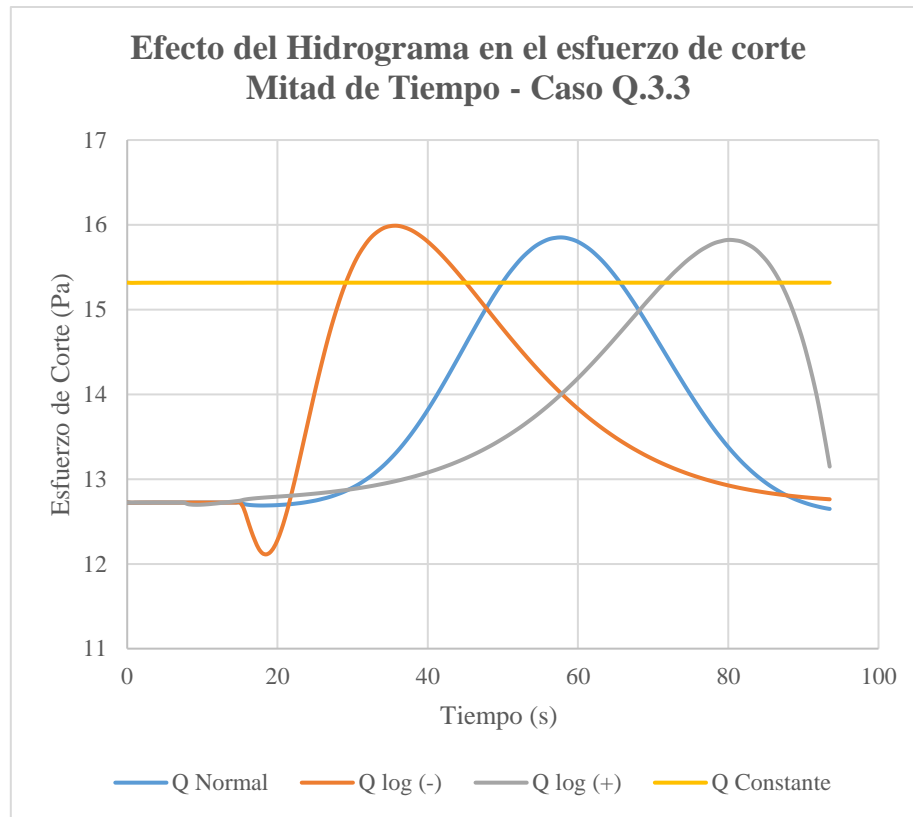


Figura 4.11. Influencia del cambio de caudal variable y constante en la mitad del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.3.

Para la mitad del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma correspondió a un total de 93.5 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.11, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, son de valor igual a 4.4% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (-), 3.5% para el hidrograma de distribución normal y 3.3% en su diferencia más acotada para el hidrograma log (+).

Se puede apreciar también un efecto inverso, en donde el esfuerzo de corte disminuye abultadamente de manera inicial en un 4.8% frente a su valor inicial y luego experimenta un alza hasta llegar a su valor máximo en un período de 18 segundos, correspondiente al 19.0% del tiempo total de la simulación para el caso de hidrograma log (-).

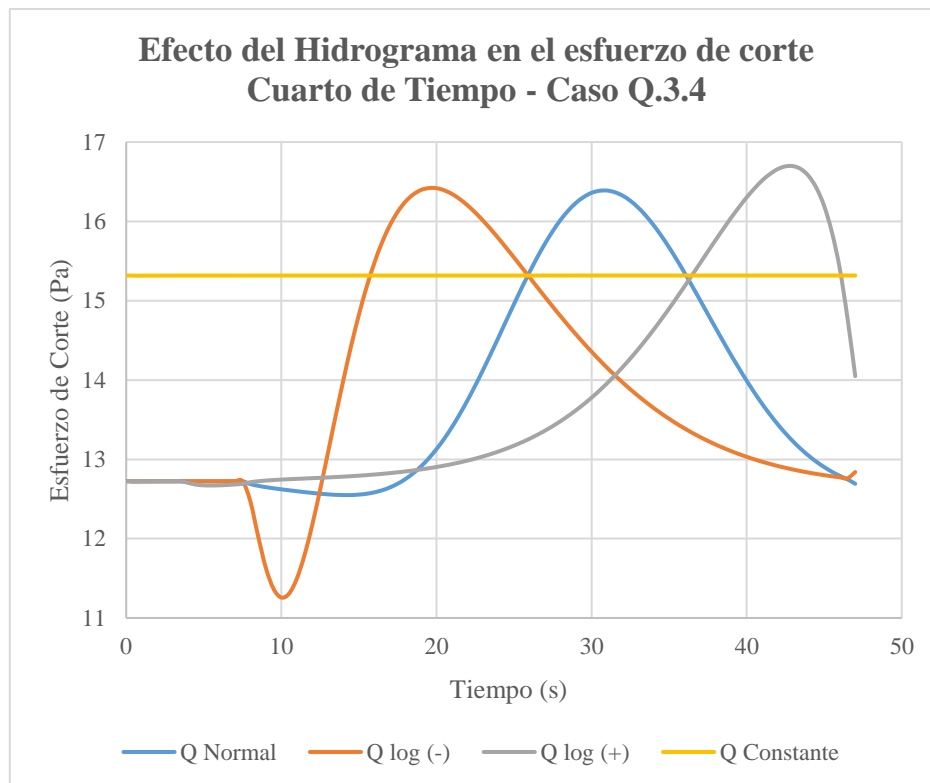


Figura 4.12. Influencia del cambio de caudal variable y constante en el cuarto del tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso Q.3.

Para el cuarto del tiempo original propuesto en esta simulación para cada hidrograma, correspondió a un total de 47 segundos y como se puede apreciar en la Figura 4.12, para el tiempo ejecutado de la simulación las diferencias en el esfuerzo de corte máximo considerando de manera independiente tres hidrogramas de caudales variables en el tiempo en comparación si se considera un hidrograma de caudal constante, es de valor igual a 9.0% en su diferencia más abultada para el hidrograma log (+), 7.2% para el hidrograma log (-) y 7.0% en su diferencia más acotada para el hidrograma de distribución normal.

Se puede apreciar también un efecto inverso, en donde el esfuerzo de corte disminuye abultadamente de manera inicial en un 11.5% frente a su valor inicial y luego experimenta un alza hasta llegar a su valor máximo en un período de 10 segundos, correspondiente al 21.3% del tiempo total de la simulación para el caso de hidrograma log (-).

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se observa que el cambio de caudal en el tiempo es inversamente proporcional al esfuerzo de corte.

4.2 Efecto del coeficiente de rugosidad en el esfuerzo de corte

Se analizó el efecto del cambio en el coeficiente de Manning sobre el esfuerzo de corte. Se consideró el esfuerzo de corte máximo producido por hidrogramas de caudal variable con distinta distribución frente al esfuerzo de corte máximo producido por un hidrograma de caudal constante. Se analizó distintos períodos de duración de las simulaciones, considerando el doble, la mitad y un cuarto del tiempo original propuesto, estableciendo las demás condiciones iniciales y de borde fijas. A continuación, se detallan los casos de análisis en la siguiente Tabla.

Tabla 4.5. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del coeficiente de rugosidad en el esfuerzo de corte.

Caso	Pendiente	Coef. Manning	Longitud	Q inicial	Q final
[#]	[m/m]	[]	[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
1.1	0.009	0.015	8	0.132	0.196
1.2	0.009	0.030	8	0.132	0.196
1.3	0.009	0.040	8	0.132	0.196

Finalmente, se tienen las siguientes tres Figuras de acuerdo con los casos expuestos en la Tabla 4.2, las cuales muestran de forma independiente, la influencia en la variación del coeficiente de Manning sobre el esfuerzo de corte si se utiliza un hidrograma de caudal variable frente a uno de caudal constante.

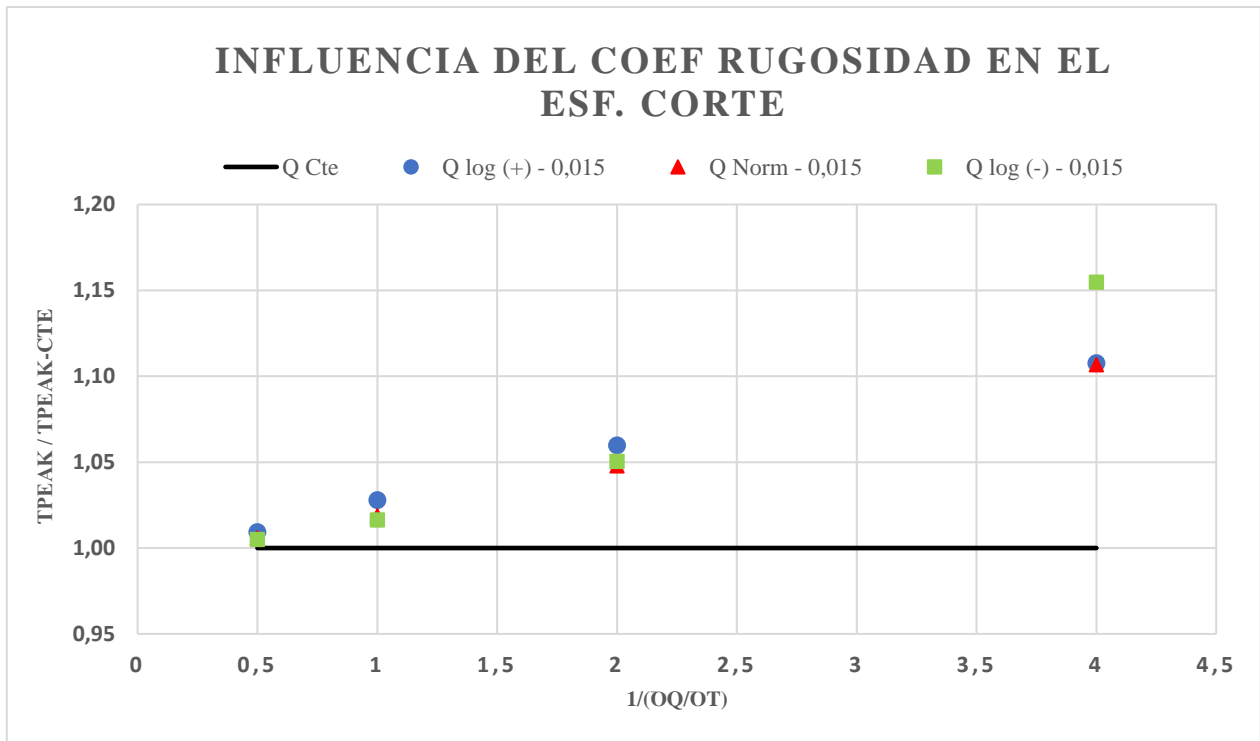


Figura 4.13. Influencia del coeficiente de rugosidad en el flujo transiente sobre el esfuerzo de corte peak considerando hidrogramas con caudal cte y variables en el tiempo, caso 1.1.

La Figura 4.13 nos muestra la influencia del coeficiente de Manning de valor igual a 0.015, estableciendo una relación entre el valor del esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma que considera un caudal variable frente a un hidrograma de caudal constante en el tiempo. Se aprecia que, para el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 1.88% para el hidrograma de distribución normal, 2.80% el hidrograma log (+) y 1.64% para el hidrograma log (-). Para el doble del tiempo de simulación propuesto la diferencia es de valor igual a 0.60% para el hidrograma de distribución normal, 0.93% el hidrograma log (+) y 0.51% para el hidrograma log (-). Para el caso con la mitad del tiempo original propuesto de simulación total, la diferencia va en aumento alcanzando 4.79% para el hidrograma de distribución normal, 5.98% el hidrograma log (+) y 5.05% para el hidrograma log (-). Finalmente, como se pudo apreciar en los análisis anteriores, disminuyendo a la cuarta parte del tiempo total de simulación, se tiene que la diferencia se vuelve más abultada aún, siendo de valor igual a 10.68% para el hidrograma de distribución normal, 10.77% el hidrograma log (+) y aumenta de manera abultada al valor de 15.48% para el hidrograma log (-).

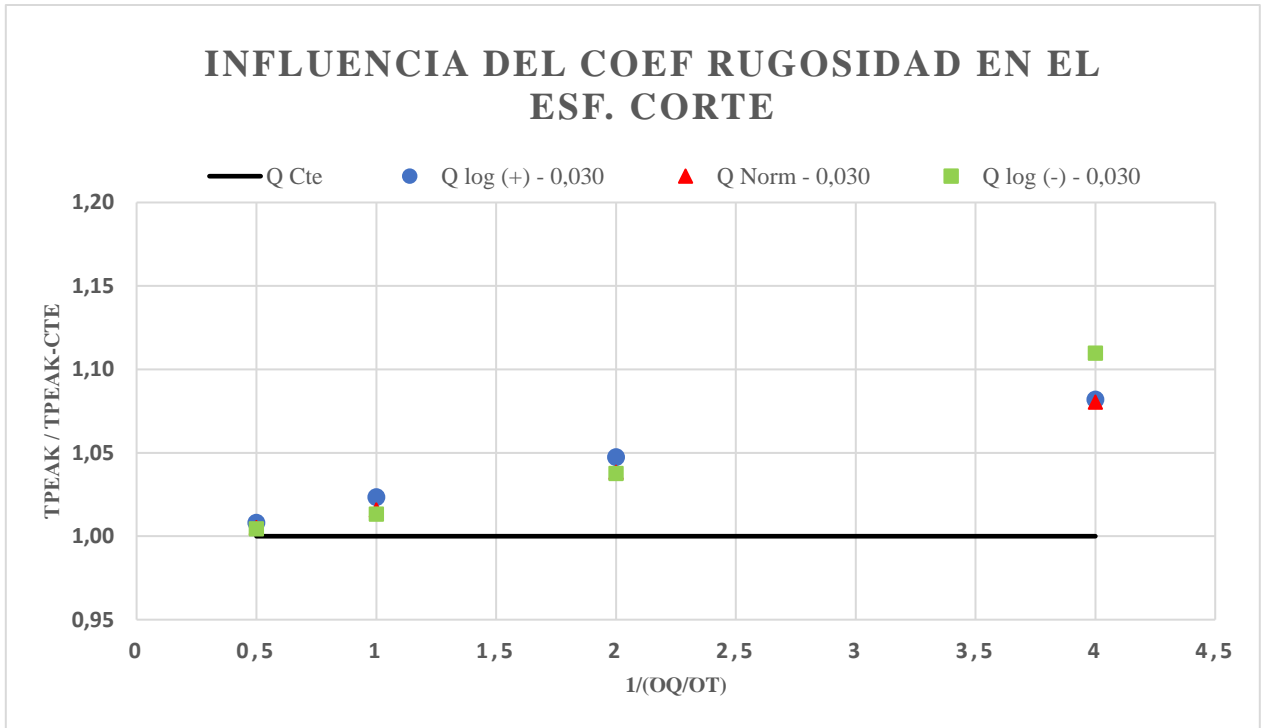


Figura 4.14. Influencia del coeficiente de rugosidad en el flujo transiente sobre el esfuerzo de corte peak considerando hidrogramas con caudal cte y variables en el tiempo, caso 1.2.

La Figura 4.14 nos muestra la influencia del coeficiente de Manning de valor igual a 0.030, estableciendo una relación entre el valor del esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal variable frente a un hidrograma de caudal constante en el tiempo. Se aprecia que, para el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 1.57% para el hidrograma de distribución normal, 2.35% el hidrograma log (+) y 1.33% para el hidrograma log (-). Para el doble del tiempo de simulación propuesto la diferencia es de valor igual a 0.52% para el hidrograma de distribución normal, 0.81% el hidrograma log (+) y 0.45% para el hidrograma log (-). Para el caso con la mitad del tiempo original propuesto de simulación total, la diferencia va en aumento alcanzando un 3.84% para el hidrograma de distribución normal, 4.75% el hidrograma log (+) y 3.76% para el hidrograma log (-). Finalmente, como se pudo apreciar en los análisis anteriores, disminuyendo a la cuarta parte del tiempo total de simulación, se tiene que la diferencia se vuelve más abultada aún, siendo de valor igual a 8.04% para el hidrograma de distribución normal, 8.20% el hidrograma log (+) y aumenta de manera abultada a un 10.98% para el hidrograma log (-).

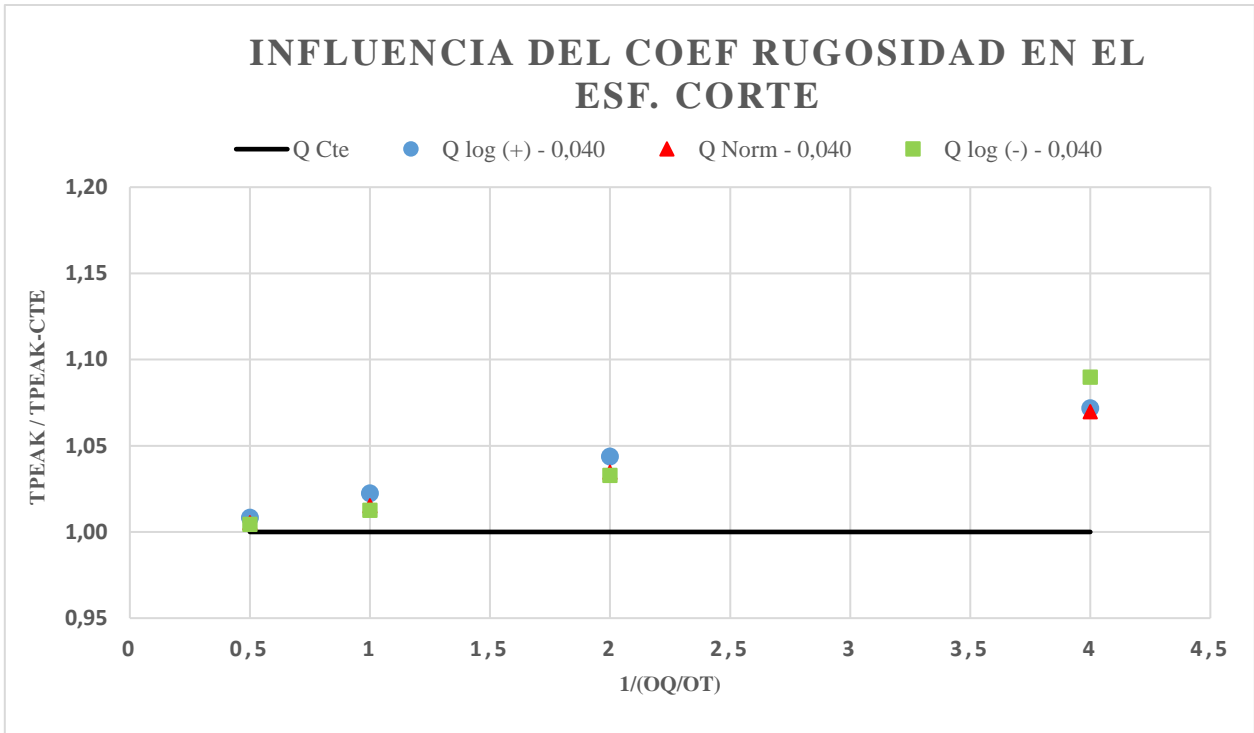


Figura 4.15. Influencia del coeficiente de rugosidad en el flujo transiente sobre el esfuerzo de corte peak considerando hidrogramas con caudal cte y variables en el tiempo, caso 1.3.

La Figura 4.15 nos muestra la influencia del coeficiente de Manning de valor igual a 0.040, estableciendo una relación entre el valor del esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal variable frente a un hidrograma de caudal constante en el tiempo. Se aprecia que, para el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 1.51% para el hidrograma de distribución normal, 2.24% el hidrograma log (+) y 1.26% para el hidrograma log (-). Para el doble del tiempo de simulación la diferencia es de valor igual a 0.53% para el hidrograma de distribución normal, 0.83% el hidrograma log (+) y 0.44% para el hidrograma log (-). Para el caso con la mitad del tiempo original propuesto de simulación total, la diferencia va en aumento alcanzando 3.47% para el hidrograma de distribución normal, 4.38% el hidrograma log (+) y 3.29% para el hidrograma log (-). Finalmente, como se pudo apreciar en los análisis anteriores, disminuyendo a la cuarta parte del tiempo total de simulación, se tiene que la diferencia se vuelve más abultada aún, siendo de valor igual a 6.98% para el hidrograma de distribución normal, 7.19% el hidrograma log (+) y aumenta de manera abultada a un 8.99% para el hidrograma log (-).

Para establecer una relación para cuantificar porcentualmente la influencia de una correcta estimación del coeficiente de rugosidad, se analizó el cambio en el esfuerzo de corte máximo para los distintos hidrogramas en los períodos de tiempo de estudio (ver Tabla 4.2).

Los resultados correspondientes se detallan en las siguientes Tablas.

Tabla 4.6. Valores Máximos del esfuerzo de corte para el caso 1.1

Caso 1.1	Q Constante	Q Normal	Q log (+)	Q log (-)
Caso Doble	9,50	9,56	9,59	9,55
Caso Original	9,50	9,68	9,77	9,66
Caso Mitad	9,50	9,95	10,07	9,98
Caso Cuarto	9,50	10,51	10,52	10,97

Tabla 4.7. Valores Máximos del esfuerzo de corte para el caso 1.2.

Caso 1.2	Q Constante	Q Normal	Q log (+)	Q log (-)
Caso Doble	13,40	13,61	13,71	13,58
Caso Original	13,40	13,47	13,51	13,46
Caso Mitad	13,40	13,91	14,04	13,90
Caso Cuarto	13,40	14,48	14,50	14,87

Tabla 4.8. Valores Máximos del esfuerzo de corte para el caso 1.3.

Caso 1.3	Q Constante	Q Normal	Q log (+)	Q log (-)
Caso Doble	15,32	15,40	15,45	15,39
Caso Original	15,32	15,55	15,66	15,51
Caso Mitad	15,32	15,85	15,99	15,82
Caso Cuarto	15,32	16,39	16,42	16,70

El valor de coeficiente de Manning para ríos con lecho de grava normalmente es considerado con el valor de 0.030 (Chow, 2004), y en función de los resultados obtenidos que se detallan en las Tablas anteriores, se puede apreciar que, en primer lugar, al disminuir el coeficiente de Manning a la mitad de su valor, de 0.030 a 0.015 y mantener los demás factores fijos, el esfuerzo de corte disminuye de un 26% a un 30% aproximadamente su valor. Así también, al aumentar el coeficiente

de Manning un tercio de su valor, de 0.030 a 0.040 y mantener los demás factores fijos, el esfuerzo de corte aumenta de un 12% a un 16% aproximadamente su valor.

Los resultados expuestos son consistentes y coinciden con el análisis anterior respecto a la variación del caudal en el tiempo en el punto 4.1. Es decir, a menor tiempo de variación de caudal, este experimenta un aumento en el esfuerzo de corte peak produciendo grandes diferencias para los distintos hidrogramas que consideran caudales variables frente a, por ejemplo, si se considera un hidrograma de caudal constante como caudal de diseño.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se observa que el aumento del coeficiente de Manning es directamente proporcional a la magnitud del esfuerzo de corte, pero, por otro lado, inversamente proporcional a la relación entre el esfuerzo de corte si se considera un hidrograma de caudal variable frente a uno de caudal constante.

4.3 Efecto de la variación del caudal en el esfuerzo de corte

Se analizó el efecto de la variación del caudal de un canal en el esfuerzo de corte, comparando dos casos de estudio los cuales tienen distinto coeficiente de Manning. Se considerará variar la magnitud del caudal inicial y final y mantener las condiciones iniciales y de borde sin variación, como se puede apreciar en la siguiente Tabla.

Tabla 4.9. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto de la variación del caudal sobre el esfuerzo de corte.

Caso [#]	Pendiente [m/m]	Coef. Manning []	Longitud [m]	Q inicial [m ³ /s]	Q final [m ³ /s]
Q1.1	0.009	0.015	8	0.132	0.196
Q1.2	0.009	0.055	8	0.132	0.196
Q2.1	0.009	0.015	8	0.232	0.343
Q2.2	0.009	0.055	8	0.232	0.343

Se analiza entonces el efecto de la variación del caudal en el esfuerzo de corte, aumentando el caudal en un 75.0%, de modo que el caudal inicial varía de 0.132 (m³/s) a 0.232 (m³/s) y el caudal

final de 0.196 (m³/s) a 0.343 (m³/s) para dos casos de estudio con coeficientes de Manning de valores iguales a 0.015 y 0.055 respectivamente, manteniendo los demás factores de condiciones iniciales y de borde fijas en un tiempo total de simulación de 227 segundos, de los cuales el 13% del tiempo de la simulación total fueron requeridos para dar inicio al modelo con su respectivo caudal inicial, 56% del tiempo total de simulación fue requerido para dar continuidad al cambio de caudal de su valor inicial a su valor final y el 31% restante de tiempo fue requerido para dar término a la simulación concluyendo con su respectivo caudal final.

Comparativamente se visualiza a continuación la siguiente Figura con los casos Q1.1 y Q2.1:

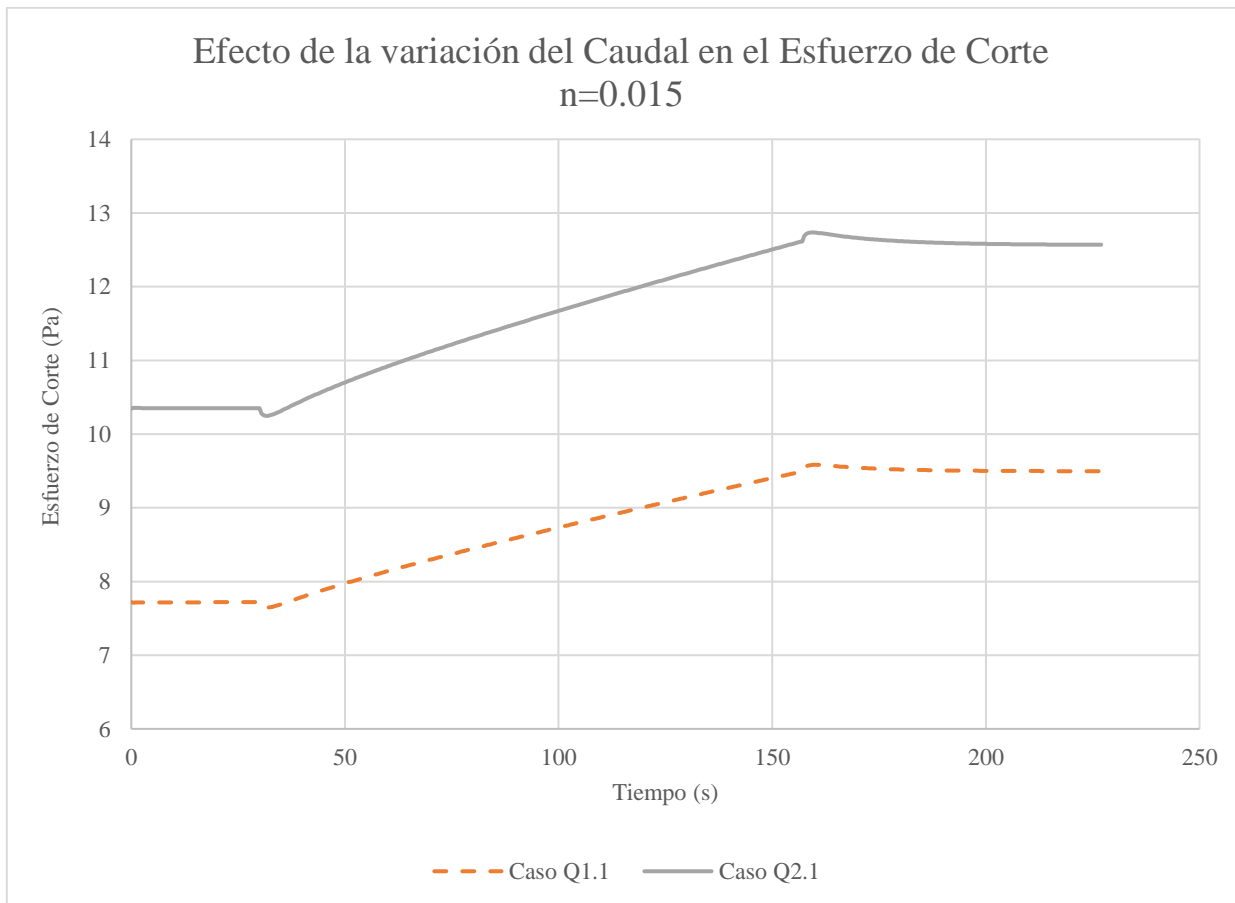


Figura 4.16. Influencia de la variación del caudal en el esfuerzo de corte, caso n=0.015.

Para los siguientes casos, se observa que el incremento del caudal es directamente proporcional a la magnitud del esfuerzo de corte como se observa en la Figura 4.16, en donde al comenzar la simulación su diferencia alcanza un porcentaje de aumento de un 34.0% con respecto al valor del esfuerzo de corte de manera inicial, de 7.72 (Pa) a 10.35 (Pa) al comenzar el flujo y un aumento

del 32.9% del valor del esfuerzo de corte cuando este alcanza su valor máximo, de 9.58 (Pa) a 12.74 (Pa), aproximadamente al 70% del tiempo total una vez comenzada la simulación.

A continuación, se analizará el efecto del mismo aumento de caudal, pero además con un coeficiente de Manning aumentado 3.6 veces su valor, de 0.015 a 0.055 y manteniendo los demás factores fijos.

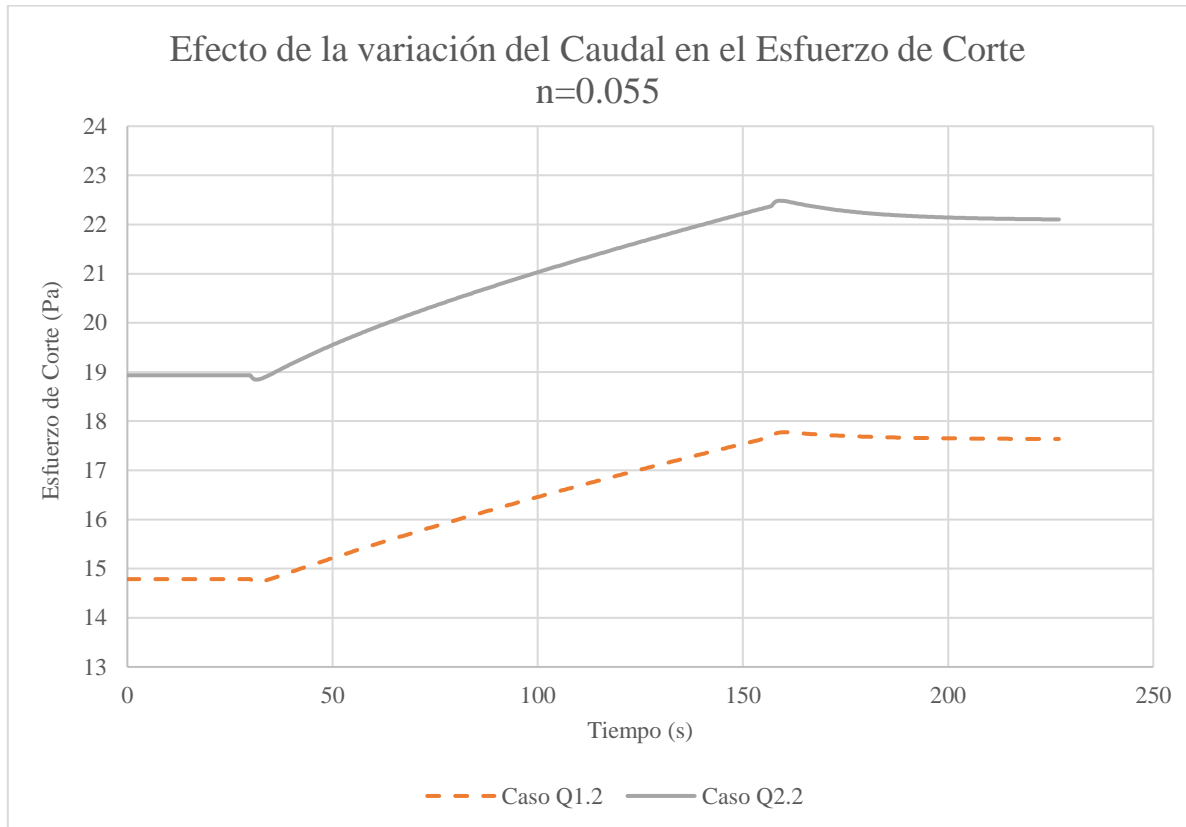


Figura 4.17. Influencia de la variación del caudal en el esfuerzo de corte, caso n=0.055.

Consistente con los análisis anteriores y por lo que se puede apreciar en la Figura 4.17, se produce un aumento la magnitud del esfuerzo de corte cuando se aumenta el caudal y el coeficiente de rugosidad, de manera inicial se aprecia que alcanza un aumento de un 28.0% del valor del esfuerzo de corte al comenzar el flujo, de 14.79 (Pa) a 17.77 (Pa) y un aumento de valor igual a 27.0% del esfuerzo de corte cuando este alcanza su valor máximo, de 18.93 (Pa) a 22.48 (Pa) aproximadamente al 70.0% del tiempo total una vez comenzada la simulación.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se analiza que el efecto del aumento de caudal de un canal incide directamente proporcional a la magnitud del esfuerzo de corte.

4.4 Efecto del largo en el esfuerzo de corte

Se analizó el efecto del cambio en el largo de un canal típico con lecho de grava con coeficientes de Manning de valores iguales a 0.030 y 0.040 respectivamente. De forma inicial se tienen en cuenta las siguientes características de casos:

Tabla 4.10. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del largo en el esfuerzo de corte.

Caso [#]	Pendiente [m/m]	Coef. Manning []	Longitud [m]	Q inicial [m ³ /s]
L3.1	0.009	0.030	8	0.132
L3.2	0.009	0.030	16	0.132
L3.3	0.009	0.030	32	0.132

Se procedió a analizar tres casos con distinta longitud, aumentando su valor al orden de dos y cuatro veces, respectivamente. Los valores de las condiciones iniciales y de borde restantes se mantuvieron fijas.

Se analizó el efecto del largo en el esfuerzo de corte considerando el cambio de caudal en el tiempo (doble, la mitad y un cuarto del tiempo original para los cuatro hidrogramas considerados), estableciendo una relación entre el esfuerzo de corte peak de cada hidrograma con el esfuerzo de corte peak de distribución de caudal constante, como se muestran en las siguientes Figuras:

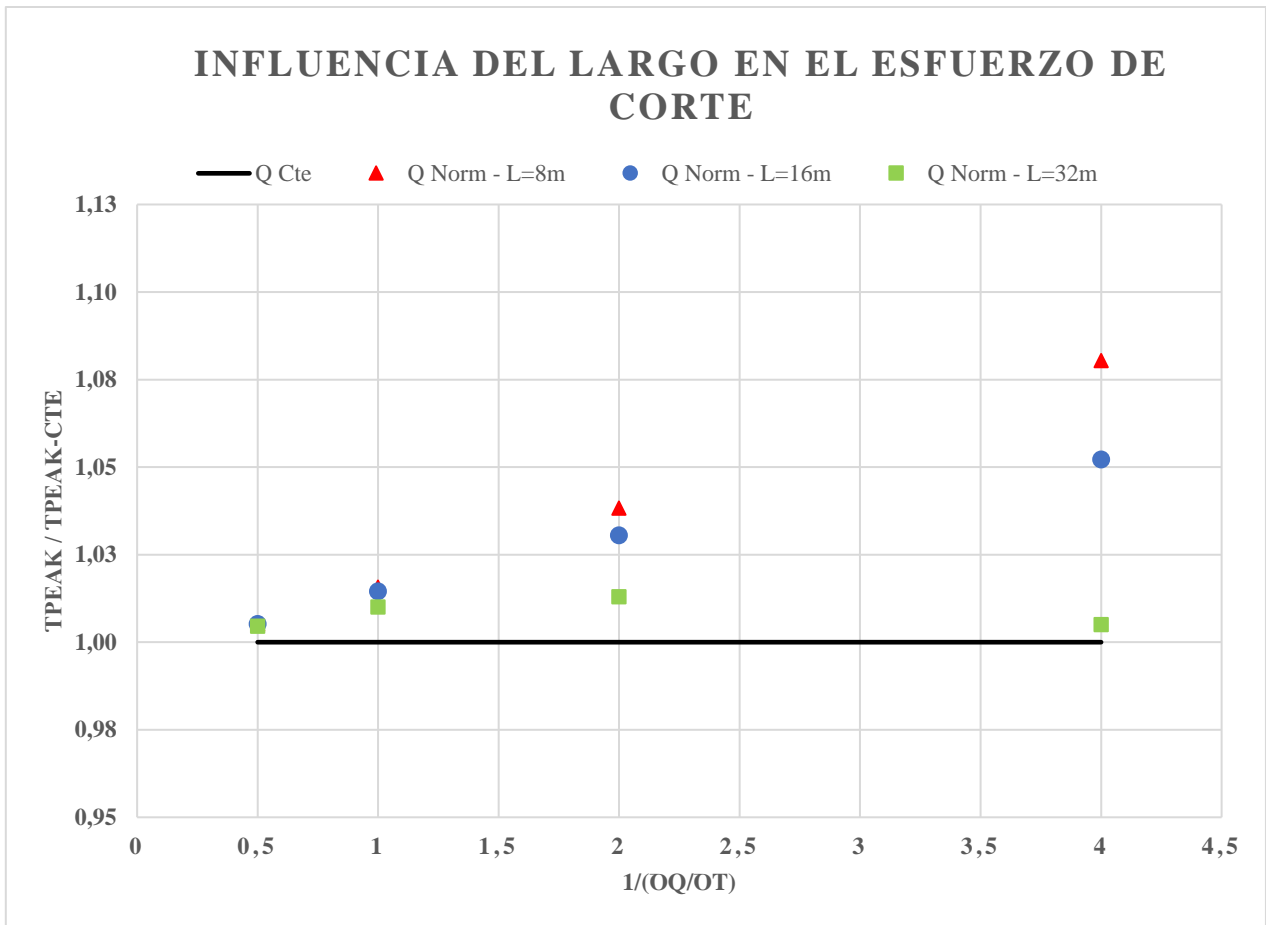


Figura 4.18. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable de distribución normal.

La Figura 4.18 nos muestra la influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo, estableciendo una relación en el valor del esfuerzo de corte máximo. Considerando un hidrograma de caudal variable de distribución normal frente a un hidrograma de caudal constante se ve que, el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 1.6% para el largo de 8 m, 1.5% para el largo de 16 m y 1.0% para un largo de 32 m. Para el doble de tiempo de simulación propuesto la diferencia es de valor igual a 0.5% para un largo de 8 m, 0.5% para un largo de 16 m y 0.5% para un largo de 32 m. La diferencia se hace más notoria para la mitad del tiempo de simulación alcanzando un valor de 3.8% para un largo de 8 m, 3.1% para un largo de 16 m y 1.3% para un largo de 32 m. En función del análisis anterior, si disminuimos el tiempo a la cuarta parte, la diferencia aumenta al orden de 8.0% para un largo de 8 m, 5.2% para un largo de 16 m y 0.5% para un largo de 32 m.

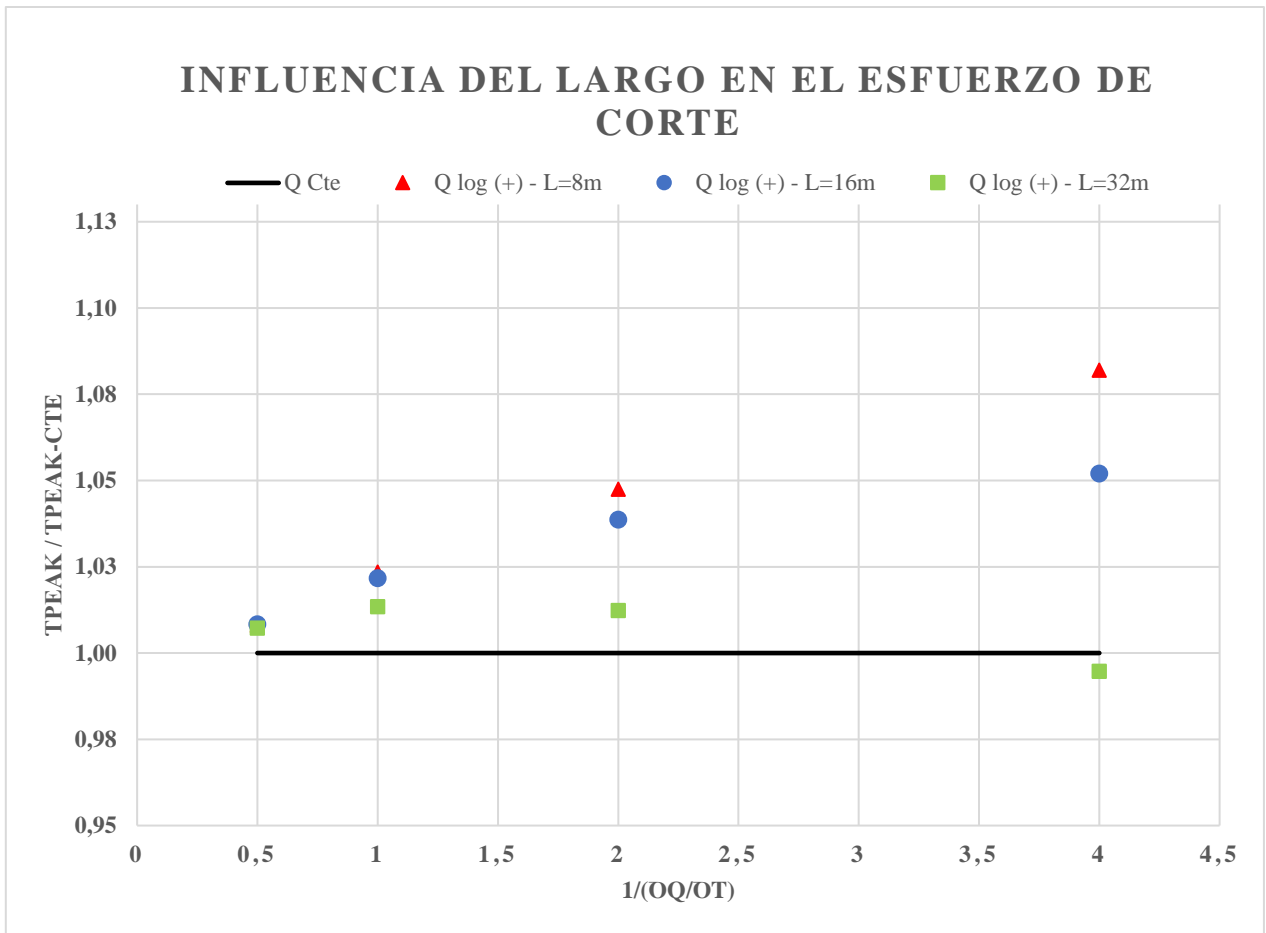


Figura 4.19. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (+).

La Figura 4.19 nos muestra la influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo, estableciendo una relación en el valor del esfuerzo de corte máximo. Considerando un hidrograma de caudal variable de distribución logarítmica frente a un hidrograma de caudal constante se ve que, el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 2.4% para el largo de 8 m, 2.2% para el largo de 16 m y 1.3% para un largo de 32 m. Para el doble de tiempo de simulación propuesto la diferencia es de valor igual a 0.8% para un largo de 8 m, 0.8% para un largo de 16 m y 1.7% para un largo de 32 m. La diferencia se hace más notoria para la mitad del tiempo de simulación alcanzando un valor de 4.7% para un largo de 8 m, 3.9% para un largo de 16 m y 1.2% para un largo de 32 m. En función del análisis anterior, si disminuimos el tiempo a la cuarta parte, la diferencia aumenta al orden de 8.2% para un largo de 8 m, 5.2% para un largo de 16 m y la diferencia disminuye al orden de 0.5% para un largo de 32 m.

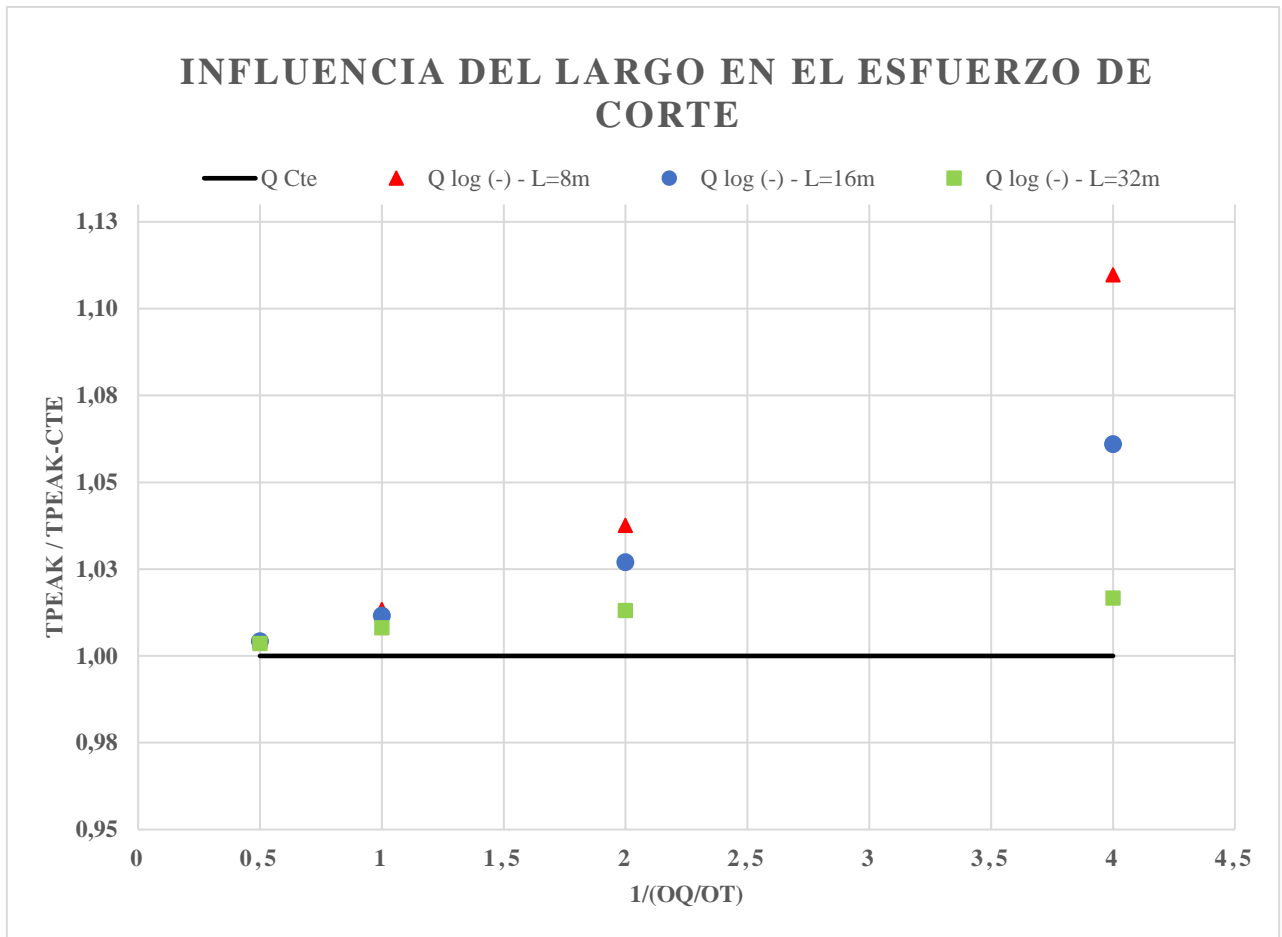


Figura 4.20. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (-).

La Figura 4.20 nos muestra la influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo, estableciendo una relación en el valor del esfuerzo de corte máximo. Considerando un hidrograma de caudal variable log (-) frente a un hidrograma de caudal constante se ve que, el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 1.3% para el largo de 8 m, 1.2% para el largo de 16 m y 0.8% para un largo de 32 m. Para el doble de tiempo de simulación propuesto la diferencia es de valor igual a 0.4% para un largo de 8 m, se mantiene en 0.4% para un largo de 16 m y 0.3% para un largo de 32 m. La diferencia se hace un poco más notoria para la mitad del tiempo de simulación alcanzando un valor de 3.8% para un largo de 8 m, 2.7% para un largo de 16 m y 1.3% para un largo de 32 m. En función del análisis anterior, si disminuimos el tiempo a la cuarta parte, la diferencia aumenta al orden de 11.0% para un largo de 8 m, 6.1% para un largo de 16 m y 1.7% para un largo de 32 m.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se analiza que, en la generalidad, al aumentar el valor del largo en las simulaciones propuestas, se ve disminuida la relación entre el esfuerzo de corte máximo considerando un caudal variable frente al esfuerzo de corte máximo considerando un caudal constante, pero ésta diferencia aumenta a medida que el cambio de caudal en el tiempo disminuye.

Se prosiguió analizar el efecto del cambio en el largo de un río sobre el esfuerzo de corte aumentando el coeficiente de Manning de 0.030 a 0.040.

A continuación, se muestran los casos de estudio en la siguiente Tabla.

Tabla 4.11. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto del largo en el esfuerzo de corte.

Caso	Pendiente	Coef. Manning	Longitud	Q inicial
 [#]	 [m/m]	 []	 [m]	 [m3/s]
L4.1	0.009	0.040	8	0.132
L4.2	0.009	0.040	16	0.132
L4.3	0.009	0.040	32	0.132

Se procedió a analizar 3 casos con distinta longitud, aumentando su valor al orden de dos y cuatro veces, respectivamente. Los valores de las condiciones iniciales y de borde restantes se mantuvieron fijas. Con esto analizar el efecto del largo en el esfuerzo de corte considerando el cambio de caudal en el tiempo, estimando el doble, la mitad y el cuarto del tiempo original propuesto considerando tres hidrogramas que consideran un caudal variable y un hidrograma que considera un caudal constante y máximo en el tiempo, estableciendo una relación entre el esfuerzo de corte peak proveniente de todos los hidrogramas frente al esfuerzo de corte peak proveniente del hidrograma que considera un caudal constante en el tiempo, como se muestran en las siguientes Figuras:

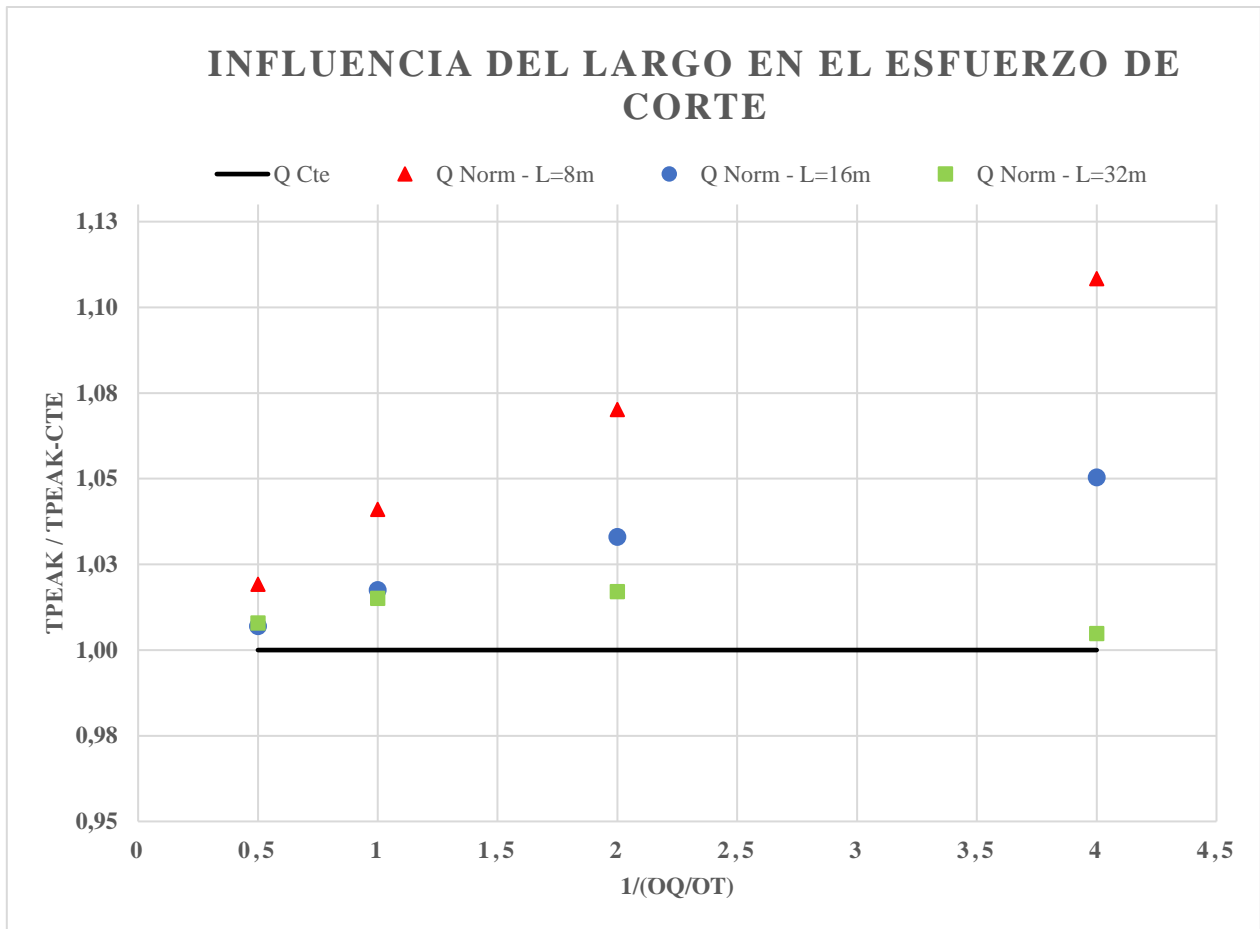


Figura 4.21. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable de distribución normal.

La Figura 4.21 nos muestra la influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo, estableciendo una relación en el valor del esfuerzo de corte máximo. Considerando un hidrograma de caudal variable de distribución normal frente a un hidrograma de caudal constante se ve que, el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 4.1% para el largo de 8 m, 1.8% para el largo de 16 m y 1.6% para un largo de 32 m. Para el doble de tiempo de simulación propuesto la diferencia es de valor igual a 1.9% para un largo de 8 m, 0.7% para un largo de 16 m y aumenta levemente a 0.8% para un largo de 32 m. La diferencia se hace un poco más notoria para la mitad del tiempo de simulación alcanzando un valor de 7.0% para un largo de 8 m, 3.3% para un largo de 16 m y 1.7% para un largo de 32 m. En función del análisis anterior, si disminuimos el tiempo a la cuarta parte, la diferencia aumenta un tanto más al orden de 10.8% para un largo de 8 m, 5.0% para un largo de 16 m y 0.5% para un largo de 32 m.

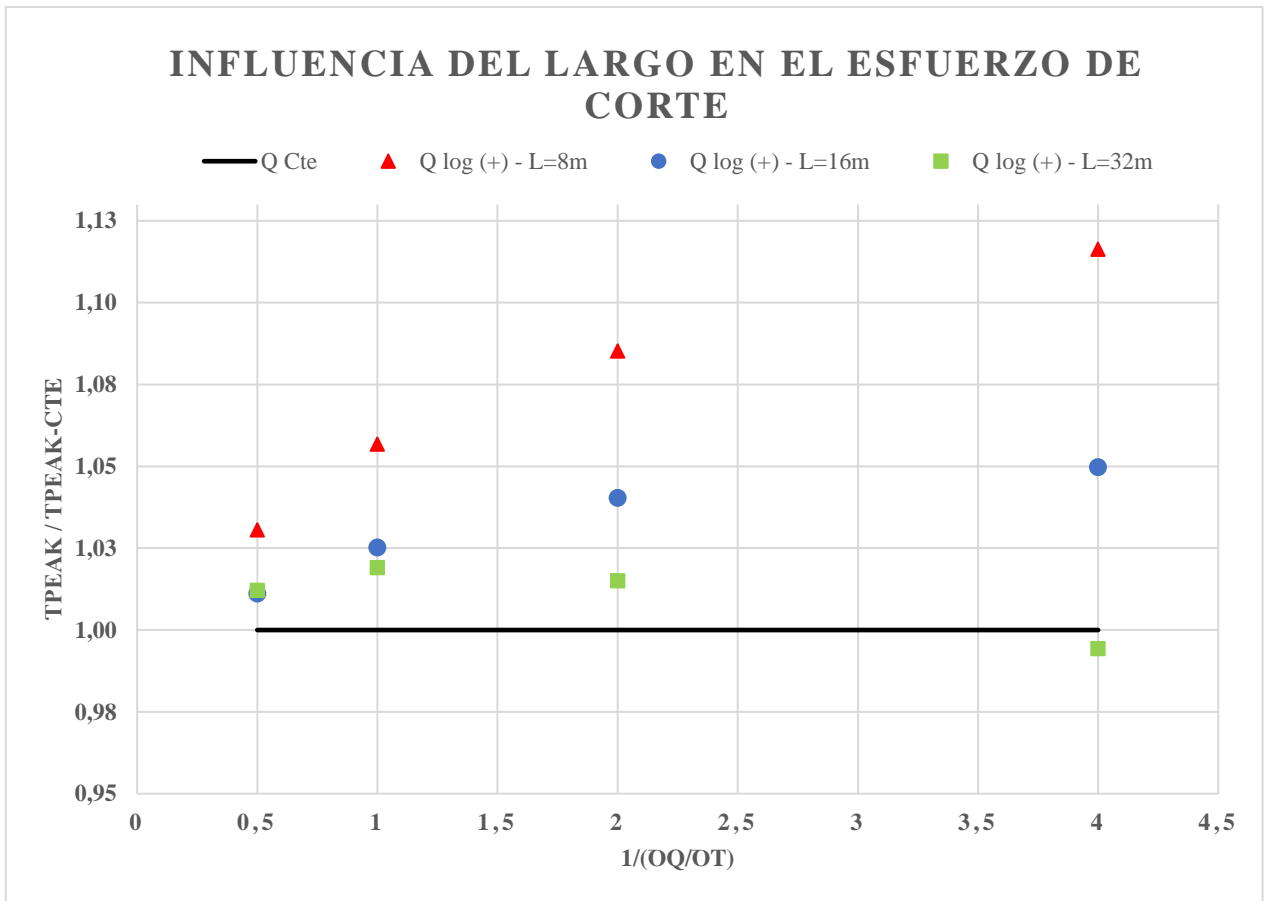


Figura 4.22. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (+).

La Figura 4.22 nos muestra la influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo, estableciendo una relación en el valor del esfuerzo de corte máximo. Considerando un hidrograma de caudal variable log (+) frente a un hidrograma de caudal constante se ve que, el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 5.7% para el largo de 8 m, 2.5% para el largo de 16 m y 1.9% para un largo de 32 m. Para el doble de tiempo de simulación propuesta la diferencia es de valor igual a 3.1% para un largo de 8 m, 1.1% para un largo de 16 m y se aumenta levemente a 1.2% para un largo de 32 m. La diferencia se hace un tanto más notorio para la mitad del tiempo de simulación alcanzando un valor de 8.5% para un largo de 8 m, 4.0% para un largo de 16 m y 1.5% para un largo de 32 m. En función del análisis anterior, si disminuimos el tiempo a la cuarta parte, la diferencia aumenta al orden de 11.6% para un largo de 8 m, 5.0% para un largo de 16 m y disminuye al orden de 0.6% para un largo de 32 m.

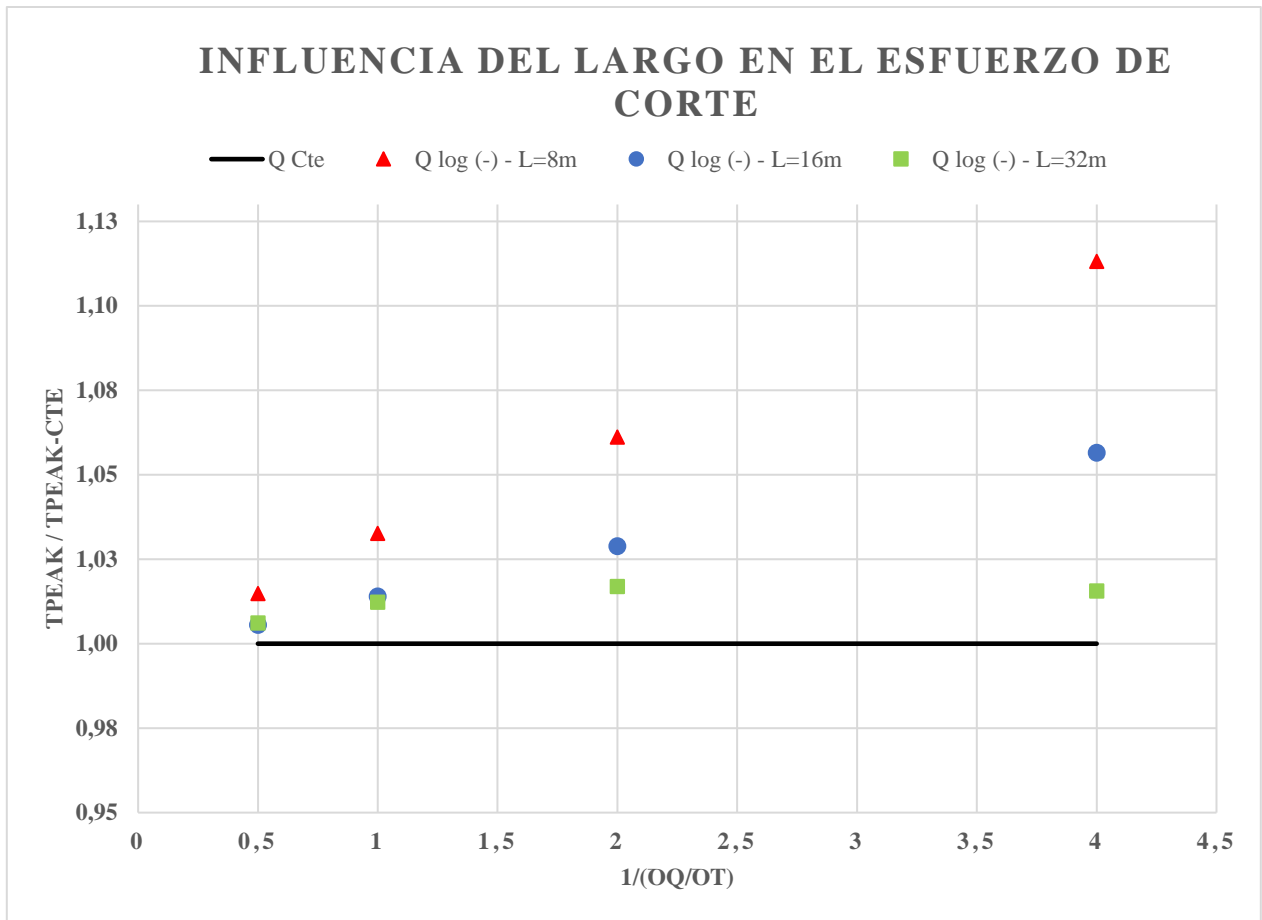


Figura 4.23. Influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo sobre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante y uno de caudal variable log (-).

La Figura 4.23 nos muestra la influencia en la variación del largo y el cambio de caudal en el tiempo, estableciendo una relación en el valor del esfuerzo de corte máximo. Considerando un hidrograma de caudal variable log (-) frente a un hidrograma de caudal constante se ve que, el tiempo original de simulación la diferencia es de valor igual a 3.3% para el largo de 8 m, 1.4% para el largo de 16 m y 1.2% para un largo de 32 m. Para el doble de tiempo de simulación propuesto la diferencia es de valor igual a 1.5% para un largo de 8 m, se mantiene en 0.6% para un largo de 16 m y se mantiene en 0.6% para un largo de 32 m. La diferencia se hace un poco más notoria para la mitad del tiempo de simulación alcanzando un valor de 6.1% para un largo de 8 m, 2.9% para un largo de 16 m y 1.7% para un largo de 32 m. En función del análisis anterior, si disminuimos el tiempo a la cuarta parte, la diferencia aumenta al orden de 11.3% para un largo de 8 m, 5.7% para un largo de 16 m y 1.6% para un largo de 32 m.

4.5 Efecto de la variación topográfica del lecho en el esfuerzo de corte

Se procedió a analizar y comparar los resultados del esfuerzo de corte máximo para el caso de un lecho que varía espacialmente en el tiempo frente a uno en el cual se mantuvo una pendiente fija y la variación espacial de la elevación del lecho se eliminó.

Se consideró tres casos distintos variando sus coeficientes de Manning, analizando magnitudes de 0.015, 0.030 y 0.040 respectivamente para distintos períodos de simulación, considerando el doble, la mitad y el cuarto de tiempo original propuesto y manteniendo las condiciones iniciales y de borde fijas. A continuación, se detalla en la siguiente Tabla:

Tabla 4.12. Condiciones iniciales y de borde para los casos de estudio en función del efecto de la variación en la topografía del lecho sobre el esfuerzo de corte.

Caso	Pendiente	Coef. Manning	Longitud	Q inicial	Q inicial
[#]	[m/m]	[]	[m]	[m³/s]	[m³/s]
S.1	0.009	0.015	8	0.132	0.196
S.2	0.009	0.030	8	0.132	0.196
S.3	0.009	0.040	8	0.132	0.196

En base a la Tabla 4.9, se expondrán los resultados de cada caso, comenzando con el caso S.1, siguiendo con el caso S.2 y finalizando con el caso S.3.

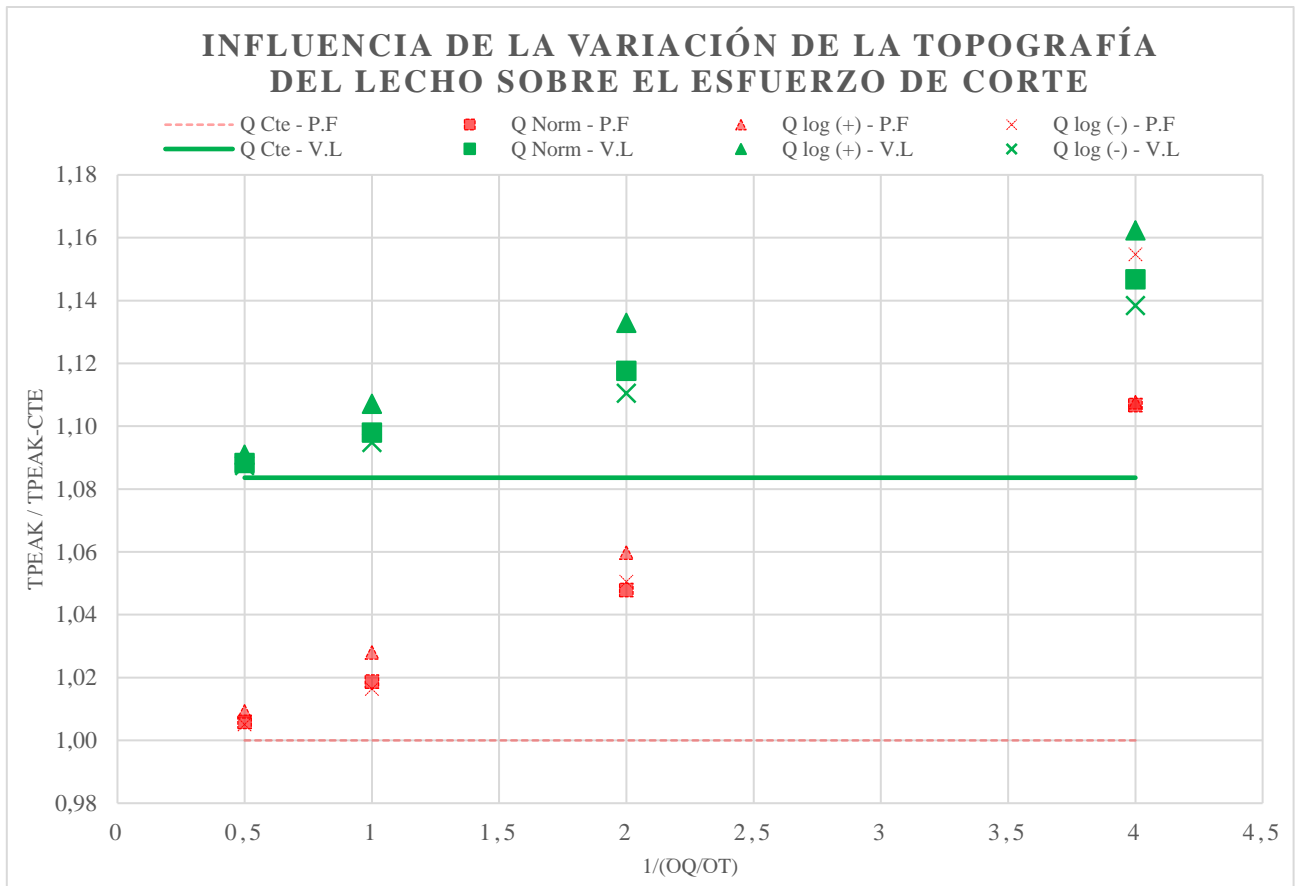


Figura 4.24. Influencia del cambio de la variación espacial y el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso S.1.

Como se puede apreciar en la Figura 4.24, se realizó la comparación de simulaciones considerando en una la variación de la topografía del lecho (V.L) frente a otra la cual considera un lecho con pendiente fija (P.F), mediante cuatro hidrogramas distintos, los cuales tres contemplan un caudal variable y uno un caudal constante en el tiempo. A su vez el tiempo de simulación se consideró para cuatro eventos distintos, contemplando el tiempo original de valor igual a 187 segundos, el doble de tiempo de valor igual a 374 segundos, la mitad del tiempo de valor igual a 93.5 segundos y el cuarto del tiempo original propuesto para la simulación de valor igual 47 segundos.

En primer lugar, se obtiene que para el hidrograma de caudal constante la diferencia en todos los períodos de tiempo considerados aumenta en un 8.36% si se considera la variación en la topografía del lecho frente a uno de pendiente fija. Para el hidrograma de distribución normal considerando el tiempo original de simulación la diferencia es un aumento de 9.80%, para el doble de tiempo aumenta a un 8,83%, para la mitad del tiempo aumenta en un 11.76% y considerando el cuarto de

tiempo aumenta en un 14.68%. Para el hidrograma log (+), el tiempo original propuesto de simulación la diferencia es un aumento de 10.72%, para el doble de tiempo aumenta en 9.10%, para la mitad del tiempo correspondiente a 93.5 segundos aumenta en 13.29% y considerando el cuarto de tiempo aumenta al valor igual a 16.24%. Finalmente, para un hidrograma log (-) considerando el tiempo original de simulación, la diferencia es un aumento de 9.49%, para el doble de tiempo aumenta a un 8.75%, para la mitad del tiempo aumenta en 11.05% y considerando el cuarto de tiempo aumenta al orden de 13.84%.

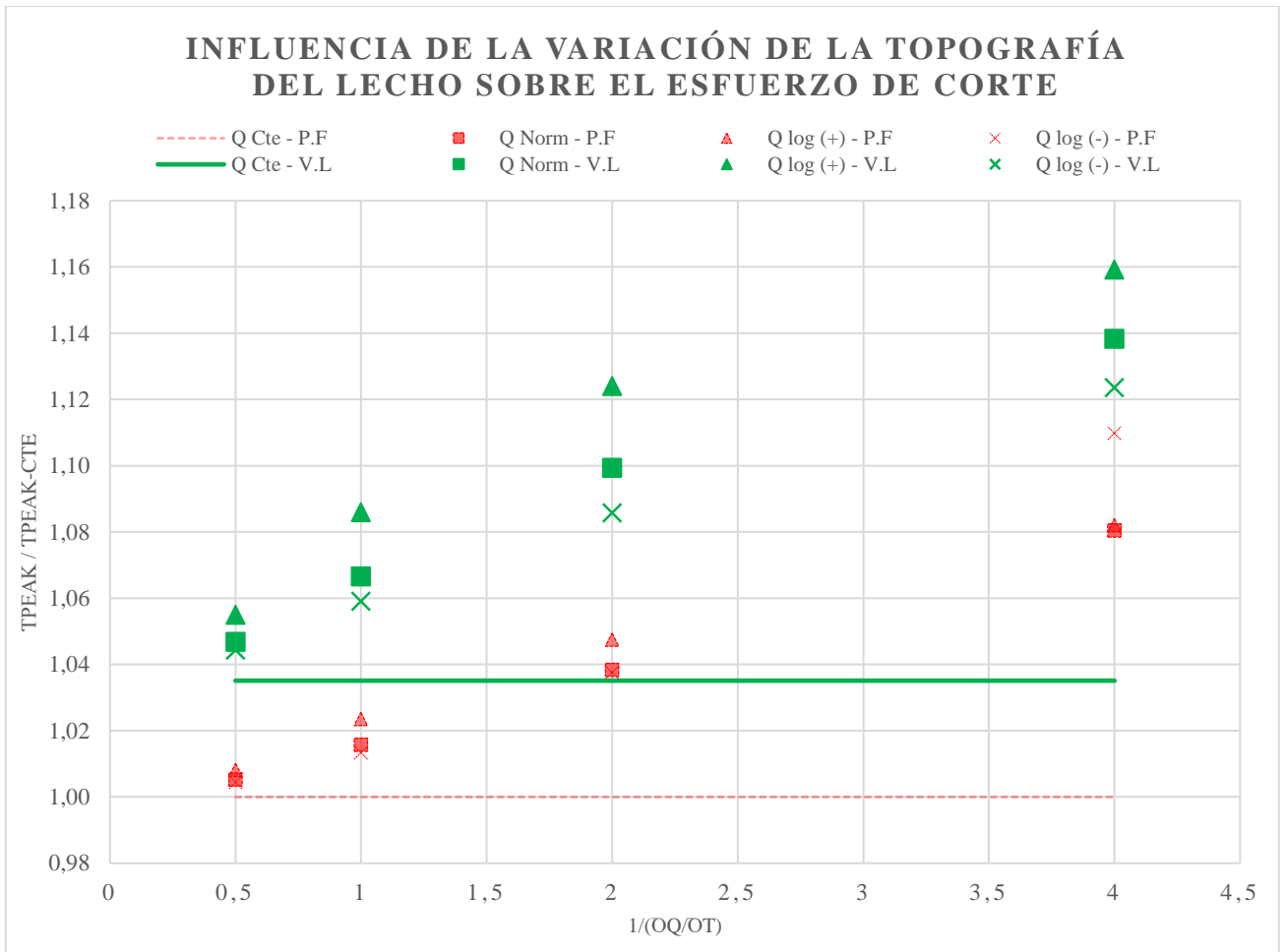


Figura 4.25. Influencia del cambio de la variación espacial y el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso S.2.

Como se puede apreciar en la Figura 4.25, se realizó la comparación de simulaciones considerando en una la variación de la topografía del lecho (V.L) frente a otra la cual considera un lecho con

pendiente fija (P.F), mediante cuatro hidrogramas distintos, los cuales tres contemplan un caudal variable y uno un caudal constante en el tiempo. El tiempo de simulación se consideró para cuatro eventos distintos, contemplando el tiempo original de valor igual a 187 segundos, el doble de tiempo de valor igual a 374 segundos, la mitad del tiempo de valor igual a 93.5 segundos y el cuarto del tiempo original propuesto para la simulación de valor igual 47 segundos.

En primer lugar, se obtiene que para el hidrograma de caudal constante la diferencia en todos los períodos de tiempo considerados aumenta en un 3.51% si se considera la variación en la topografía del lecho frente a uno de pendiente fija. Para el hidrograma de distribución normal considerando el tiempo original propuesto de simulación la diferencia es un aumento de 6.66%, para el doble de tiempo aumenta a un 4.68%, para la mitad del tiempo aumenta en 9.94% y considerando el cuarto de tiempo en un 13.83%. Para el hidrograma log (+) considerando el tiempo original de simulación la diferencia es un aumento en un 8.59%, para el doble de tiempo aumenta en un 5.49%, para la mitad del tiempo aumenta en 12.40% y considerando el cuarto de tiempo aumenta en un 15.92%. Finalmente, para el hidrograma log (-) se obtiene que al considerar el tiempo original propuesto de simulación la diferencia es un aumento de un 5.91%, para el doble de tiempo aumenta en un 4.43%, para la mitad del tiempo aumenta en 8.58% y considerando el cuarto de tiempo aumenta en un 12.36%.

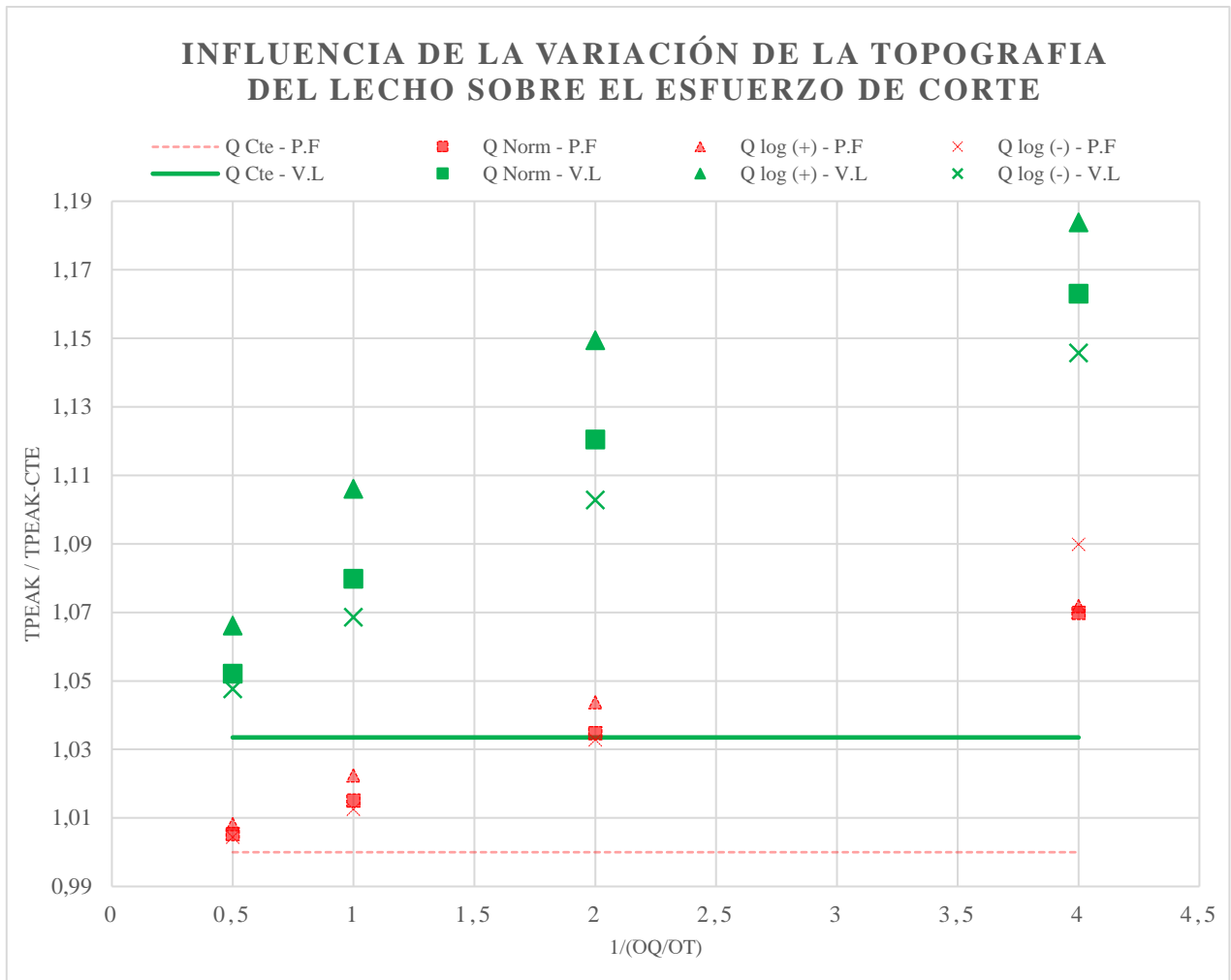


Figura 4.26. Influencia del cambio de la variación espacial y el tiempo sobre el esfuerzo de corte, caso S.3.

Como se puede apreciar en la Figura 4.26, se realizó la comparación de simulaciones considerando en una la variación de la topografía del lecho (V.L) frente a otra la cual considera un lecho con pendiente fija (P.F), mediante cuatro hidrogramas distintos, los cuales tres contemplan un caudal variable y uno un caudal constante en el tiempo. El tiempo de simulación se consideró para cuatro eventos distintos, contemplando el tiempo original de valor igual a 187 segundos, el doble de tiempo de valor igual a 374 segundos, la mitad del tiempo de valor igual a 93.5 segundos y el cuarto del tiempo original propuesto para la simulación de valor igual 47 segundos.

En primer lugar, se obtiene que para el hidrograma de caudal constante la diferencia en todos los períodos de tiempo considerados aumenta en un 3.35% si se considera la variación en la topografía del lecho frente a uno de pendiente fija. Para el hidrograma de distribución normal considerando

el tiempo original propuesto de simulación la diferencia es un aumento de un 7.98%, para el doble de tiempo de simulación aumenta en un 5.21%, para la mitad del tiempo aumenta en un 12.05% y considerando el cuarto de tiempo aumenta en un 16.31%. Para el hidrograma log (+) considerando el tiempo original propuesto la diferencia es un aumento de 10.61%, para el doble de tiempo aumenta en un 6.62 %, para la mitad del tiempo aumenta en un 14.94% y considerando el cuarto de tiempo aumenta en un 18.39%. Finalmente, para el hidrograma log (-) considerando el tiempo original de simulación la diferencia es un aumento de 6.86%, para el doble de tiempo aumenta en un 4.77%, para la mitad del tiempo aumenta en un 10.29% y considerando el cuarto de tiempo aumenta en un 14.57%.

De esta manera se observa que al considerar la variación topográfica del lecho aumenta la relación entre el esfuerzo de corte máximo considerando un hidrograma de caudal variable frente al esfuerzo de corte máximo considerando un hidrograma de caudal constante.

4.6 Cuantificación y efecto del transporte de sedimento

De manera tal de cuantificar el volumen o cantidad de masa de sedimentos del tipo granular de diámetro medio mínimo aproximado de 2 mm, transportados en el lecho de un canal en un día completo, se utilizarán los resultados con mayores diferencias en la relación del esfuerzo de corte máximo producido por cada uno de los distintos hidrogramas de caudal variable frente a un hidrograma con caudal constante para finalmente homologarlo a un caso real, donde se pueda apreciar de manera teórica y en función con los resultados anteriormente obtenidos, el volumen o cantidad de masa que se moviliza si se considera la componente dinámica del hidrograma y se estiman de una forma adecuada los parámetros correspondientes al flujo transiente.

Con el objetivo de extrapolar los resultados obtenidos a un caso real, se utilizarán los datos correspondientes al río Cautín, considerando un periodo de retorno de 200 años, el cual posee un esfuerzo de corte peak aproximado de 110 Pa (Jaramillo, 2013).

A continuación, se muestra la estimación en función del punto 3.1.

Según la ecuación (3.1), se tiene:

$$\tau^* = \frac{110}{(2650 - 1000) * 9.81 * 0.002} = 3.4$$

Siguiendo la *ecuación (3.2)*, se tiene:

$$q_s^* = 8 * (3.4 - 0.047)^{3/2} = 49.07$$

A partir de la *ecuación (3.3)*, se obtiene el caudal del sedimento transportado por metro lineal considerando partículas transportadas de diámetro medio iguales a 2mm.

$$q_s = 49.07 * \sqrt{\left(\frac{2650}{1000} - 1\right)} 9.81 * 0.002^3 = 3.18 * 10^{-6} \quad (m^3/s/m)$$

Siguiendo la *ecuación (3.4)*, considerando un ancho promedio de 100 metros, se obtiene el caudal del sedimento transportado por unidad de ancho.

$$Q_s = 3.18 * 10^{-6} * 100 = 3.18 * 10^{-4} \quad (m^3/s)$$

Se determina el volumen de sedimento arrastrado en un día completo, según la *ecuación (3.5)*.

$$V = 3.18 * 10^{-4} * 86400 = 27.45 \quad (m^3)$$

Finalmente, se obtiene la cantidad de masa de sedimento arrastrado en un día completo, según la *ecuación (3.6)*.

$$masa = 27.45 * 2650 = 72745.05 \quad (kg)$$

Por tanto, teóricamente el río caudín arrastraría 72.75 toneladas de sedimento en un día completo. Si consideramos los resultados con las diferencias porcentuales más amplias con respecto al valor del esfuerzo de corte máximo, para un hidrograma considerando un caudal variable frente a uno considerando un caudal constante en el tiempo, se tienen valores porcentuales de 10.98% (ver Figura 4.14) y 18.39% (ver Figura 4.26), correspondientes al efecto del coeficiente de rugosidad y la variación en la topografía del lecho sobre el esfuerzo de corte respectivamente.

En función de la diferencia porcentual, se cuantificará nuevamente la cantidad de masa de sedimento transportado en un día si se considera la componente dinámica del hidrograma para las

variables que arrojaron los resultados con diferencias más abultadas y que, por lo tanto, tienen mayores implicancias en el transporte de sedimentos.

En primer lugar, se considerará la diferencia porcentual obtenida en función del coeficiente de Manning el cual se aprecia en la Figura 4.14, equivalente a un aumento del 10.98% del valor del esfuerzo de corte máximo, por lo que su modulo aumentaría al valor de 122.1 (Pa).

A continuación, se muestra la estimación en función del punto 3.1.

Según la *ecuación (3.1)*, se tiene:

$$\tau^* = \frac{122.1}{(2650 - 1000) * 9.81 * 0.002} = 3.77$$

Según la *ecuación (3.2)*, se tiene:

$$q_s^* = 8 * (3.77 - 0.047)^{3/2} = 57.49$$

Según la *ecuación (3.3)*, se obtiene el caudal del sedimento transportado por metro lineal considerando partículas transportadas de diámetro medio iguales a 2mm.

$$q_s = 57.49 * \sqrt{\left(\frac{2650}{1000} - 1\right) 9.81 * 0.002^3} = 3.72 * 10^{-6} \quad (m^3/s/m)$$

Según la *ecuación (3.4)*, considerando un ancho promedio de 100 metros, se obtiene el caudal del sedimento transportado por unidad de ancho.

$$Q_s = 3.72 * 10^{-6} * 100 = 3.72 * 10^{-4} \quad (m^3/s)$$

Se determina el volumen de sedimento arrastrado en un día completo, según la *ecuación (3.5)*.

$$V = 3.18 * 10^{-4} * 86400 = 32.16 \quad (m^3)$$

Finalmente, se obtiene la cantidad de masa de sedimento arrastrado en un día completo, según la ecuación (3.6).

$$masa = 32.16 * 2650 = 85226.35 \text{ (kg)}$$

Por tanto, teóricamente el río cautín arrastraría 85.23 toneladas de sedimento granular en un día completo, el cual equivale a una diferencia de 12.48 toneladas de sedimento arrastrado sólo por considerar la componente dinámica del hidrograma y en función del resultado con mayor diferencia obtenido en el análisis del coeficiente de Manning.

Finalmente, se considerará la diferencia porcentual obtenida en función de la variación de la topografía del lecho el cual se aprecia en la Figura 4.26, equivalente a un aumento del 18.39% del valor del esfuerzo de corte máximo, por lo que su magnitud aumentaría al valor de 130.2 Pa.

A continuación, se describe la metodología utilizada en función del punto 3.1 del presente trabajo. Según la ecuación (3.1), se tiene:

$$\tau^* = \frac{130.2}{(2650 - 1000) * 9.81 * 0.002} = 4.02$$

Según la ecuación (3.2), se tiene:

$$q_s^* = 8 * (4.02 - 0.047)^{3/2} = 63.42$$

Según la ecuación (3.3), se obtiene el caudal del sedimento transportado por metro lineal considerando partículas transportadas de diámetro medio iguales a 2mm.

$$q_s = 63.42 * \sqrt{\left(\frac{2650}{1000} - 1\right) 9.81 * 0.002^3} = 4.11 * 10^{-6} \text{ (m}^3\text{/s/m)}$$

Según la ecuación (3.4), considerando un ancho promedio de 100 metros, se obtiene el caudal del sedimento transportado por unidad de ancho.

$$Q_s = 4.11 * 10^{-6} * 100 = 4.11 * 10^{-4} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Se determina el volumen de sedimento arrastrado en un día completo, según la *ecuación (3.5)*.

$$V = 4.11 * 10^{-4} * 86400 = 35.48 \text{ (m}^3\text{)}$$

Finalmente, se obtiene la cantidad de masa de sedimento arrastrado en un día completo, según la *ecuación (3.6)*.

$$masa = 35.48 * 2650 = 94014 \text{ (kg)}$$

Por tanto, teóricamente el río caudín arrastraría 94.01 toneladas de sedimento en un día completo, el cual equivale a una diferencia de 21.27 toneladas de sedimento arrastrado en un día completo, sólo por considerar la componente dinámica del hidrograma y en función del resultado con mayor diferencia obtenido en el análisis de la variación en la topografía del lecho.

CAPITULO 5
CONCLUSIONES

Capítulo 5. Conclusiones

- Esta investigación ha demostrado que el considerar la componente dinámica de un hidrograma al analizar las variables que afectan al flujo uniforme en el tiempo y espacio en una crecida, tales como el coeficiente de Manning (n), pendiente (S), variación de caudal en el tiempo ($\partial Q/\partial t$) y longitud del tramo del río (L), generan implicancias considerables en el transporte de sedimento para partículas granulares de diámetro medio aproximado de 2mm en el lecho de un canal prismático unidimensional de ancho constante, las cuales pueden ser utilizadas para extrapolarlas de forma teórica a un caso real que cumpla con las características descritas.
- En función de los resultados obtenidos y objetivos propuestos en la presente investigación, se observó que la mayor incidencia en los factores que afectan al flujo transiente está dado por el coeficiente de Manning y la consideración de la variación topográfica del lecho. Una adecuada estimación de dichas variables considerando un hidrograma de caudal variable, produce una diferencia de hasta 18.4% en el valor del esfuerzo de corte máximo si se compara con el valor máximo considerando un hidrograma de caudal constante, el cual es utilizado usualmente en la práctica y no contempla la componente dinámica de un hidrograma. Si extrapolamos esta diferencia a un caso real, con los datos recopilados para el río Cautín, equivaldría a 21.27 toneladas de sedimento arrastrado en un día completo, sólo por considerar la componente dinámica del hidrograma y en función del resultado obtenido en el análisis de la variación topográfica del lecho frente a un lecho de pendiente fija que considera un caudal constante.

Con respecto al análisis de las variables que afectan al flujo transiente sobre el esfuerzo de corte, se concluye que:

- A medida que el cambio de caudal en el tiempo aumenta, también aumenta el valor del esfuerzo de corte.
- La mayor diferencia en el esfuerzo de corte máximo para el análisis del efecto del cambio de caudal en el tiempo corresponde al hidrograma definido como $\log(-)$, en donde el cambio de caudal se realiza en un período corto al inicio del hidrograma y decrece en el tiempo lentamente hasta llegar al final de éste. A su vez, al aumentar el cambio de caudal en el

tiempo el hidrograma log (-), experimenta una disminución inicial en el esfuerzo de corte cuando se experimenta un cambio de caudal de manera rápida inicialmente.

- A medida que aumenta la magnitud del esfuerzo de corte, aumenta la magnitud del coeficiente de Manning.
- La relación entre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal variable frente al esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante decrece a medida que aumenta el coeficiente de Manning y a su vez la diferencia más amplia fue la obtenida por el hidrograma log (-), siendo de valor igual a 10.98%, en donde el cambio de caudal hasta alcanzar su valor máximo se realiza en un período corto de tiempo y decrece en el tiempo lentamente hasta el final del hidrograma.
- Al considerar la variación en la topografía del lecho, la relación entre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal variable frente al esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante aumenta, y la mayor diferencia del presente estudio corresponde al hidrograma log (+), siendo de valor igual a 18.39% y corresponde a una de las diferencias más amplias.
- El largo, es una de las variables que se creía podía ser arbitraria en cuanto a su valor, de acuerdo con los resultados obtenidos se observa que el largo afecta en el esfuerzo de corte. A medida que el valor del largo aumenta, la relación entre el esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal variable frente al esfuerzo de corte peak considerando un hidrograma de caudal constante decrece.

Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
τ	: Esfuerzo de corte producido en el lecho del río	Pa
τ^*	: Esfuerzo de corte adimensional	-
τ_c^*	: Esfuerzo de corte crítico adimensional	-
ρ_w	: Densidad del agua	kg/m ³
ρ_s	: Densidad del sedimento	kg/m ³
ρ	: Densidad del flujo	kg/m ³
u_*	: Velocidad de corte	m/s
U	: Velocidad media sección transversal	m/s
t	: Tiempo	s
g	: Aceleración de gravedad	m/s ²
D_{50}^3	: Tamaño medio del diámetro de sedimento	m
q_s^*	: Caudal de sedimento transportado adimensional	-
q_s	: Caudal de sedimento transportado por metro lineal	m ³ /s/m
Q_s	: Caudal de sedimento transportado por ancho del tramo del río	m ³ /s
R_h	: Radio hidráulico	kg/m ³
V	: Volumen de sedimento transportado	m ³
B	: Ancho del tramo del río	m
x	: Distancia longitudinal	m
h	: Profundidad del flujo	m
S	: Pendiente del tramo del río	m/m
S_f	: Pendiente de fricción	m/m
S_0	: Pendiente del lecho	m/m

Bibliografía

- Bhuban Ghimire & Zhi-Qiang Deng. (2011). Event flow Hydrograph-Based method for shear velocity estimation. *Journal of Hydraulic Research*, **49(2)**, 272-275. doi:10.1080/00221686.2011.552463
- Bhuban Ghimire & Zhi-Qiang Deng. (2013). Event flow Hydrograph-Based method for modeling sediment transport. *Journal of Hydrologic Engineering*, **18(8)**, 919-928. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000710
- Bravard, J.-P., & Petit, F. (2009). Geomorphology of Streams and Rivers. *Encyclopedia of Inland Waters*, 387-395. doi:10.1016/B978-012370626-3.00043-0
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Donoso, J. (2007). Desarrollo y verificación de un modelo numérico unidimensional de flujo para canales abiertos de ancho uniforme mediante volúmenes finitos,. *Informe de Memoria de Título*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Elosegi, A., & Sabater, S. (2003). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Rubes Editorial.
- García, M. H. (2008). *Sedimentation Engineering*. New York: ASCE.
- Jaramillo, V. (2013). *Estudio de socavación en el tercer puente sobre el río Cautín en Temuco*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Khosronejad, A., & Kang, S. (2011). Curvilinear immersed boundary method for simulating coupled flow and bed morphodynamic interactions due to sediment transport phenomena. *Advances in Water Resources*, 829-843.
- Link, O., & Donoso, J. (2008). Development and verification of a numerical model for calculation of flow in open channels using the finite volume method. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 190-200.
- Mrokowska, M., Rowiński, P., & Kalinowska, M. (2015). Evaluation of friction velocity in unsteady flow experiments. *Journal of Hydraulic Research*, **53(5)**, 659-669. doi:10.1080/00221686.2015.1072853
- R.J. Garde. (1995). *History of fluvial hydraulics*. Roorke, India: New Age International (P) Limited.
- Rubio, T. O. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Bogotá: Editorial Kimpres Ltda.
- Silva Araya, W., & Rivera Santos, J. (2016). *Guías para la Elaboración de Estudios de Transporte de Sedimentos para la Extracción de Material en los Ríos de Puerto Rico*. San Juan, Puerto Rico: Puerto Rico water resources and environmental research institute. doi:10.13140/RG.2.2.15467.54563
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. Ciudad de México: UNAM.
- Swan, C., & Horton, T. (1905). *Hydraulic diagrams for the discharge of conduits and canals*. New York: The Engineering News Publishing Company.

