



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

**MÉTODO PARA ASIGNACIÓN ÓPTIMA ENTRE USOS IN SITU RECREATIVOS Y
USOS EXTRACTIVOS EN RÍO MAIPO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

PAULINA PAZ GÉNOVA ALONSO

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAMES MC PHEE TORRES
PEDRO RIVERA IZAM

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Paulina Paz Génova Alonso
FECHA: Octubre 2016
PROFESOR GUÍA: Marcelo Olivares Alveal

MÉTODO PARA ASIGNACIÓN ÓPTIMA ENTRE USOS IN SITU RECREATIVOS Y USOS EXTRACTIVOS EN RÍO MAIPO, CHILE

Actualmente, en Chile la ley sólo asigna derechos de agua a los usos extractivos y el caudal ecológico es la única herramienta para la asignación de recursos hídricos para usos no extractivos. Para definir adecuadamente mecanismos de asignación para usos del agua no extractivos es necesario contar con los beneficios asociados a los usos in situ del agua. En este trabajo se propone una metodología para analizar los *tradeoffs* entre usos recreativos in situ y usos extractivos del agua. El método propuesto se basa en la determinación de los beneficios de usos in situ y extractivos en función del caudal asignado a cada uso. El primero de estos se representa con curvas de beneficio que miden la calidad de actividades recreativas en función del caudal que se mantiene en el río. Por otra parte, se obtiene el costo de oportunidad o pérdida de beneficio de los usos extractivos para generar la curva de oferta de los usos in situ.

La metodología propuesta consiste en obtener el beneficio cualitativo de varias actividades recreativas en ríos en función de variables hidráulicas asociadas al caudal, luego se estudia la relación entre el caudal y estas variables hidráulicas para un número de perfiles representativo del río en estudio. Como resultado se obtienen las curvas de beneficio de actividades recreativas en función del caudal para cada perfil. Finalmente estos resultados se integran para representar el beneficio en función del caudal pasante en todo el tramo de río estudiado, y se cuantifica la cantidad de kilómetros de río continuo que garantizan la práctica de estas actividades en función del caudal durante la temporada de verano. Por otra parte, la pérdida de beneficio de los usos extractivos al dejar una unidad más de caudal en el río puede interpretarse como la curva de costo marginal (curva de oferta) de usos in situ y se obtiene del costo de oportunidad del uso extractivo. La integración de la curva de beneficio de usos in situ y la curva de oferta, expresadas como función del caudal mantenido en el río permite identificar los *tradeoffs* entre estos usos.

El método se aplica al río Maipo, donde los principales usos del agua que entran en conflicto corresponden a rafting, kayak e hidroelectricidad. Los resultados del método indican que los usos extractivos reducen el beneficio de las actividades recreativas del río Maipo durante los meses de febrero, marzo, abril y octubre. El caso más crítico se observa en abril bajo un escenario de hidrología seca, donde la cantidad de kilómetros de río aptas para la práctica de estas actividades se ve reducida en casi 14 kilómetros. Los impactos en las actividades in situ se ven aminorados al restringir la cantidad de agua a extraer del río. Durante los meses de verano se obtienen las asignaciones óptimas de recursos hídricos entre ambos usos que garantizan una cierta cantidad de kilómetros de río para la práctica de las actividades con la menor pérdida económica del uso extractivo.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a mis papas, por siempre estar presente, por su infinito cariño y apoyo en todo momento, por siempre creer en mí y alentarme a lograr las cosas que he querido. Gracias por todo el esfuerzo que han hecho por entregarnos la oportunidad y las herramientas para estudiar lo que escogimos. También quiero agradecer a mi hermana Lorena, por siempre tomarse muy en serio su rol de hermana mayor, ser mi ejemplo y mi amiga y al Gino, el más molesto, chistoso y regalón de la familia por ser tan cercano y alegrarme con su presencia. En general, agradezco a mi familia por todos los lindos momentos, por siempre animarme y enorgullecerse por cada uno de mis logros.

Sin duda, una de las cosas que más agradezco de la universidad, es haber conocido a la Belén y la Anto, que desde primer año hasta hoy hemos sido amigas inseparables. Son infinitos los recuerdos que tenemos juntas durante estos siete años; nuestras rabietas en plan común, las conversaciones y risas, los viajes, las juntas para copuchar, tomar y comer, carretes inolvidables, etc. Les agradezco porque llenaron de lindos, alegres y felices momentos todos estos años y también por siempre poder contar con ustedes, por su apoyo y sus consejos.

También quiero agradecer a Cayo, por ser mi partner y siempre estar conmigo entregándome todo el cariño y alegría, por ser un apoyo fundamental y llenar de buenos y lindos momentos todos estos años de universidad.

A todos mis amigos y compañeros que he conocido durante estos siete años, tanto en plan común como en civil, les agradezco por hacer más entretenidas las jornadas de estudio, por las instancias de relajación, carretes y celebraciones. En especial al mejor grupo de estudio, Michelle, Abel, Enzo y Fari por su amistad y todas las salidas para despejarnos, reír, y copuchar y al resto de mis compañeros de pecera, por las risas, los chachateos, las celebraciones y por crear el mejor ambiente de trabajo.

Infaliblemente, agradezco a mis amigas de toda la vida, las del colegio, porque han estado en todas y a pesar de que a veces sea difícil vernos, la amistad siempre es la misma.

Por último me siento muy agradecida de todo lo que me ha entregado la Universidad de Chile, sobre todo por los profesores del departamento de Hidráulica, quienes se caracterizan por su disposición, su compromiso y cercanía con sus alumnos. Gracias a los profesores que formaron parte de mi comisión; Marcelo Olivares, James Mc Phee y Pedro Rivera. En especial agradezco a mi profesor guía, Marcelo Olivares por su dedicación, su entusiasmo e interés durante todos estos meses.

Termino esta larga etapa universitaria, muy feliz por todo lo aprendido, lo vivido, por todo el esfuerzo realizado y por todas las grandes personas que conocí.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Organización del informe	3
2	Revisión bibliográfica	4
2.1	Identificación de usos in situ	5
2.2	Beneficio de usos recreacionales.....	6
2.3	Métodos de asignación óptima entre usos in situ y usos extractivos	12
3	Metodología Propuesta.....	14
3.1	Beneficio actividades recreativas en función de variables hidrológicas	14
3.2	Antecedentes caso de estudio	18
3.3	Beneficios usos in situ recreativos en función del caudal.....	19
3.4	Beneficios usos extractivos en caso de estudio	20
3.5	Relación entre caudales medios mensuales en río y caudales captados por usos extractivos	20
3.6	Curva de oferta usos in situ recreativos	21
3.7	Asignación óptima entre usos in situ y usos extractivos.....	22
4	Caso de estudio.....	24
4.1	Recopilación antecedentes subcuenca Alto Maipo	24
4.1.1	Usos in situ	25
4.1.2	Perfiles topobatimétricos	25
4.1.3	Eje hidráulico	26
4.1.4	Usos extractivos (ubicación puntos de captación y restitución).....	26
4.1.5	Datos fluviométricos cauces	29
4.1.6	Caudal ecológico cauces.....	31
4.2	Recopilación información sobre generación energía eléctrica PHAM y precio horario de venta energía en SIC	32
4.3	Beneficio actividades recreativas en función del caudal	34
4.4	Beneficio económico usos extractivos.....	42
4.5	Régimen natural, actual y con PHAM bajo limitaciones en las extracciones y su incidencia en los usos in situ recreativos	48
4.6	Análisis integrado de <i>tradeoffs</i>	60
5	Conclusiones	82
	Bibliografía	86

ANEXOS	I
ANEXO A: EJEMPLO EJE HIDRÁULICO PARA UN PERFÍL EN RÍO MAIPO	II
ANEXO B: COSTOS MARGINALES DE ENERGÍA EN BARRA A. JAHUEL A NIVEL HORARIO EN MESES DE OCTUBRE-ABRIL CDEC-SIC	III
ANEXO C: PRECIO ENERGÍA MENSUAL EN FUNCIÓN DEL CAUDAL MEDIO EXTRAIDO EN MESES DE VERANO	VI
ANEXO D: BENEFICIO ECONÓMICO Y MARGINAL MENSUAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO	X

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, en Chile se discute sobre la cuantificación de caudales de reserva para uso turístico, es decir, para las actividades de uso recreacional en cauces, de manera que se logre asegurar su uso con una buena calidad y permanencia en el tiempo debido a que cada día esta área toma mayor relevancia a nivel de país. Es por esto, que surge la necesidad de contar con herramientas y metodologías que puedan cuantificar el caudal necesario para la realización de diversas actividades recreativas en ríos y encontrar la relación entre caudal y el beneficio asociado a la calidad de la recreación, con el fin de introducir estos usos in situ en los métodos de asignación de agua.

La asignación eficiente de recursos hídricos disponible en un curso de agua para diversos usos es una tarea compleja. Sin embargo, cuando se trata de usos extractivos, ya sea consuntivos o no consuntivos, existen métodos para cuantificar los beneficios asociados al caudal asignado que permiten la aplicación de un criterio de eficiencia. Sin embargo, la asignación de agua para usos que no involucran extraer el agua del cauce es efectuada con criterios de aseguramiento de caudales mínimos, sin consideración de los *tradeoffs* involucrados entre estos usos.

Estudios han comprobado que la idea de un caudal mínimo no es el óptimo para la conservación de ecosistemas y para usos in situ de valor para la sociedad (Loomis, 1998). Por otra parte, no es claro que el criterio de asegurar caudales mínimos sin consideración de los usos que compiten por el recurso resulte en una asignación óptima de caudales a ser mantenidos en el cauce, pudiendo resultar en una subasignación o sobreasignación. En consecuencia, surge la importancia de definir una metodología para determinar caudales a mantener en los ríos tal que las aguas puedan ser aprovechadas por los usos no extractivos que sean valorados por la sociedad. Loomis (1998) establece que para cumplir estos objetivos se requiere de comparaciones entre costos y beneficios entre los usos extractivos y no extractivos del agua. Sin embargo, estos últimos relacionados con usos asociados a recreación y protección ecosistémica tienen un valor para la sociedad pero no un precio para poder guiar la asignación de recursos.

El presente trabajo pretende avanzar en la cuantificación de los beneficios asociados a recreación en los cauces con la finalidad de poder analizar los *tradeoffs* entre usos recreativos in situ y usos extractivos del agua, de manera que sea posible una adecuada asignación entre estos usos.

1.1 Objetivos

La presente memoria tiene como objetivo principal estudiar los *tradeoffs* entre usos recreativos in situ y usos extractivos del agua.

Los objetivos específicos desarrollados en la presenta memoria son los siguientes.

- Identificar y caracterizar los usos del agua en cauces naturales y su relación con el caudal del río.
- Contar con curvas de beneficio cualitativo de los usos recreativos in situ en la subcuenca de Alto Maipo en función del caudal que se mantiene en el río Maipo.
- Generar curva de oferta de recursos hídricos en el río Maipo a partir del costo de oportunidad de usos extractivos.
- Encontrar las asignaciones óptimas de recursos hídricos para usos recreacionales y extractivos, es decir, los caudales a mantener en el cauce que permiten mantener una cierta calidad de las actividades recreativas al menor costo de oportunidad del uso extractivo.

1.2 Organización del informe

En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica referente a la identificación de usos in situ del agua, los indicadores necesarios para medir el beneficio de estos usos en función de las variables hidrológicas de los cauces y métodos de asignación de agua entre estos usos y los usos extractivos.

En el Capítulo 3 se describe la metodología general propuesta para estudiar los *tradeoffs* entre usos in situ recreativos y usos extractivos.

En el Capítulo 4 se detalla la metodología propuesta aplicada al caso de estudio. Primero, se presenta la recopilación de antecedentes de la zona en estudio. Luego se describe el procedimiento realizado para medir los beneficios cualitativos de los usos in situ asociados a recreación en función del caudal. Se presenta metodología para medir beneficios de los usos extractivos en la zona de estudio. Se estudia el comportamiento del régimen hidrológico del río ante extracciones de caudal y su incidencia en el beneficio de usos recreativos. Por último, se presenta un análisis de los *tradeoffs* entre usos recreativos in situ y usos extractivos y se obtienen los resultados de las asignaciones eficientes de recursos hídricos a cada uso a nivel mensual.

Finalmente, el Capítulo 5 contiene las conclusiones referentes a los resultados obtenidos.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Poff et al. (1997) plantea que muchos ríos ya no sostienen a especies nativas socialmente valoradas ni sustentan ecosistemas que proporcionan importantes bienes y servicios. Esto es producto del manejo de los recursos hídricos, el cual ha producido una importante alteración del régimen natural de los ríos (Richter et al.,1997). El conflicto se produce debido a la competencia entre los distintos usos que ofrecen los ríos, tales como producción de energía hidroeléctrica, suministro de agua potable, suministro de agua para riego, recreación en lagos, navegación recreacional en cauces, pesca y el mantenimiento de la integridad del ecosistema (Cardwell, 1996).

Los principales usos in situ que ofrecen los ríos corresponden aquellos relacionados con la conservación del ecosistema y los usos recreativos, donde el primero de estos ha sido ampliamente estudiado. Existen varios estudios referentes a métodos para cuantificar el caudal necesario a mantener en los ríos para usos de conservación de especies. Dentro de estos métodos se tienen los propuestos por Poff et al. (2010) y Ritcher et al. (1997) quienes plantean que el régimen variable natural en lugar de un caudal mínimo es necesario para mantener y proteger el ecosistema y la biodiversidad. Arthingtont al. (2010) define el caudal ambiental el cual corresponde a la cantidad de agua en el río requerida para sostener ecosistema y proteger los servicios que. Sin embargo, los métodos más reconocidos son los basados en la variación de hábitat disponible para especies en función del caudal. Jowet (1997) propone varios métodos para obtener el flujo necesario para protección ambiental destacando el método de hábitat como el más confiable y de utilidad para analizar los *tradeoffs* con otros usos del agua. Por otro lado Jowet (1997) señala que el método de hábitat no se limita únicamente a los peces sino que también existen métodos que analizan las velocidades y alturas para usos recreacionales. En consecuencia debido a la gran cantidad de información referente al cálculo de caudal necesario para protección del ecosistema, el presente trabajo se enfocara en la cuantificación de los beneficios asociados a los usos recreativos en cauces.

En Chile, el Catastro y Localización de Usos Públicos No Extractivos o Usos In Situ del Agua, de la Dirección General de Aguas reconoce la importancia que tienen los usos públicos no extractivos del agua y también al planteamiento sobre una modificación de la legislación de aguas en Chile y reconocimiento de estos usos in situ en el Código de Agua nacional. Este estudio puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones y relevante para valorar económicamente estos usos en el futuro con el fin de realizar cambios en las políticas y regulaciones referentes a la asignación de recurso hídrico. Además es un aporte para reconocer la importancia de los usos públicos no extractivos (DGA, 2010).

Según Colby (1990) variados estudios demuestran que el valor económico de los usos in situ del río puede ser estimado para ser comparado con el valor de usos extractivos, en donde el beneficio marginal de estos usos in situ puede ser igual o mayor al beneficio marginal de los usos extractivos

2.1 Identificación de usos in situ

A continuación se definen los usos in situ de los cauces y se listan aquellas actividades recreativas asociadas a estos usos, según información disponible por la Dirección General de Aguas en Chile y estudios en Canadá.

La DGA (2000) define “Los usos no extractivos o in situ corresponden a los usos que ocurren en el ambiente natural de la fuente de agua sin extracción o consumo del recurso” e introduce los siguientes conceptos de utilidad para el presente trabajo.

Uso recreacional: se entiende como aquellos usos que generan un bienestar social, estético y sociológico. Estos usos se pueden subdividir en dos, aquellos de contacto directo y los sin contacto directo.

Actividades del uso recreacional de contacto directo:

- Natación
- Rafting
- Kayakismo
- Canotaje
- Velerismo
- Pesca
- Navegación/ Transporte

Actividades del uso recreacional sin contacto directo:

- Fotografías
- Caminatas
- Navegación en embarcaciones mayores
- Esparcimiento

Por otro lado existe información internacional para clasificar estos usos con el fin de evaluar aquellas actividades de mayor relevancia para el presente estudio.

A continuación se señala un esquema de los distintos tipos de usos del agua asignados en Canada. Ministry of Supply and Services Canadá, 1993, US Government s/f; Valls, 1980) (ver Figura 1).

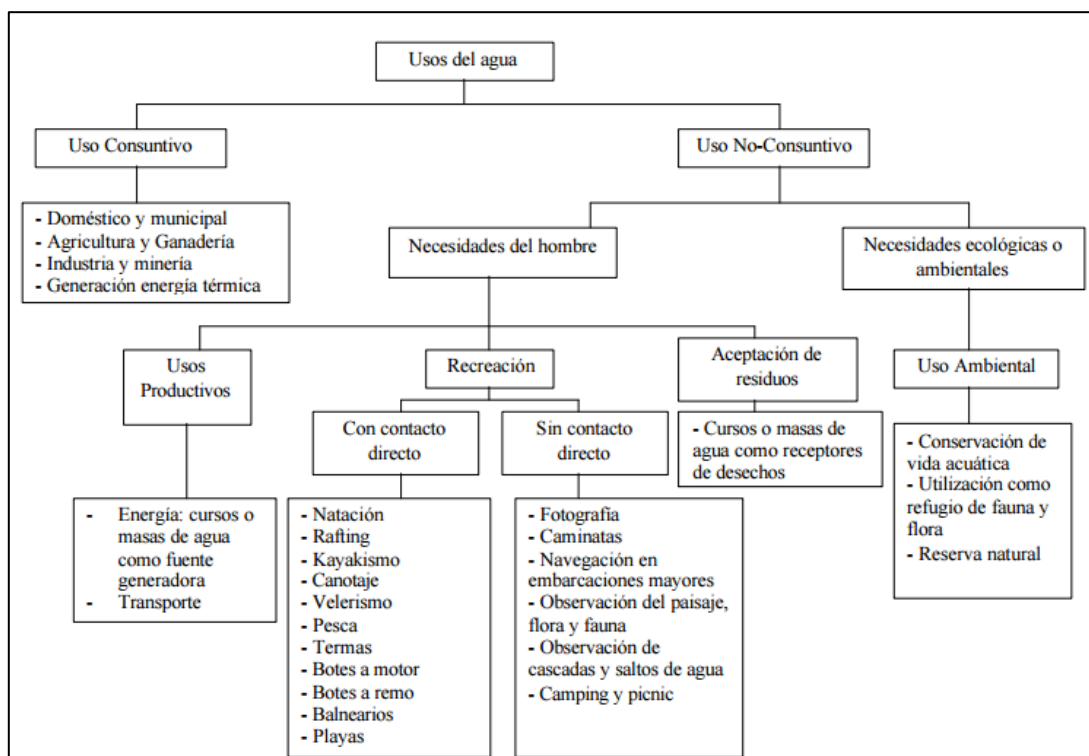


Figura 1: Usos del agua, Fuente: Ministerio Servicios Canadá (1993).

A partir de lo anterior, para el presente estudio se tomarán en cuenta las siguientes actividades recreativas.

- Baño
- Rafting
- Kayak
- Canoa
- Veleros
- Pesca en orilla
- Pesca en bote sin motor
- Pesca en bote con motor
- Bote a motor
- Bote a remo

2.2 Beneficio de usos recreacionales

Mediante una recopilación de estudios realizados tanto en Chile como en el extranjero, se obtuvo información necesaria para evaluar cuáles métodos son los más efectivos y posibles de aplicar en cauces de Chile para medir el beneficio de los usos recreacionales. En primer lugar se describen los estudios internacionales y se finalizará con los más recientes realizados en Chile.

Debido a la inexistencia de precios de mercado que permitan obtener los beneficios asociados a las actividades de recreación en cauces, se introducen opciones alternativas para la estimación de estos, tales como; la disponibilidad a pagar si el mercado existiese, precios hedónicos, valuación contingente, etc.

Principalmente existen dos diferentes enfoques para obtener beneficios económicos de usos recreacionales. El primero corresponde a analizar mercados que se relacionan de manera complementaria o suplementaria con un cierto uso, este corresponde al método de costo de viaje. El segundo enfoque corresponde a la evaluación contingente, en donde se realizan encuestas en las cuales los usuarios responden cuánto están dispuestos a pagar por específicos niveles de aprovechamiento de un cierto uso o para el aprovechamiento del agua dado distintas características del río. La disposición a pagar (WTP) corresponde específicamente a una medida de cuánto está dispuesto a pagar por obtener un metro cúbico por segundo adicional para cada usuario.

Daubert and Young (1981) establecen un método para medir el valor económico de mantener el agua en el río el cual ayudará a crear nuevas políticas de manejo o asignación de los recursos hídricos entre los usos extractivos y no extractivos. Este método estima por medio del método de valoración contingente, el valor total y marginal de la disposición a pagar por flujo adicional (WTP). Incluyen un caso de estudio en el Río Pounder, Colorado, donde se estima la disposición total agregada y la marginal a pagar por aumento de flujo por los pescadores. La curva de beneficio de pesca presenta una forma cóncava y el beneficio marginal de la pesca presenta una recta con pendiente negativa. A partir de esta recta es posible concluir que si se desea comparar los beneficios marginales de usos recreativos con los usos extractivos, entonces es recomendable evaluar la asignación para usos recreativos dentro del rango de flujo en que el beneficio marginal es positivo, ya que el tramo negativo representa que una mayor asignación de flujo para este uso conlleva una disminución en el beneficio.

Ward (1987) y Loomis (1998) plantean que los valores recreacionales pueden ser cuantificados usando el método del costo de viaje (TCM por su sigla en inglés). TCM utiliza la variación entre los costos y el número de viajes realizados para estimar una curva de demanda, además observando cómo cambia el número de viajes y las distancias máximas viajadas cuando la escorrentía aumenta, es posible obtener la disposición a pagar (WTP en inglés) cuando se tiene un mayor caudal. A pesar de que se espera en general que esta disposición a pagar por individuo sea bastante baja, el beneficio agregado de la cantidad de usuarios del río puede ser lo suficiente como para justificar una mejor asignación de los recursos donde se introduzcan estos usos recreacionales (Daubert and Young, 1981).

Es importante destacar que para utilizar los métodos anteriormente mencionados es necesario disponer de la información referente a los costos de viaje en el río que se desea estudiar o bien los resultados de encuestas sobre la disponibilidad a pagar de los usuarios por aumentos en la calidad de la recreación realizada en el río en estudio.

Por otro lado existen métodos internacionales en donde proponen variables hidrológicas máximas, mínimas y óptimas para realizar diferentes actividades recreativas en cauces naturales. Hyra (1978) propone un criterio de profundidades y velocidades máximas, mínimas y óptimas necesarias para realizar actividades recreativas en ríos (Tabla 1).

Tabla 1: Requerimientos hídricos para actividades con contacto directo (Hyra 1978)

Actividad	Requerimientos hídricos: Profundidad (H) [m] Velocidad (V) [m/s]			
		Mínimo	Máximo	Óptimo
Nado	H	1	sin limite	$\geq 1,2$
	V	0	1	0,3
Balsa	H	0,2	sin limite	0,7
	V	0	2,5	0,3-1,5
Rafting	H	0,6	sin limite	1
	V	0	4,5	0,3-3
Canoa/Kayak	H	0,5	sin limite	>1
	V	0	3	0,2-2,2
Pesca de orilla	H	0,2	1,2	0,3-0,8
	V	0	0,9	0,1-0,6
Pesca bote motor	H	0,8	sin limite	$>1,1$
	V	0	1,5	0,2-0,6
Pesca bote sin motor	H	0,3	sin limite	$\geq 0,6$
	V	0	1,2	0,5
Bote Motor	H	1	sin limite	1,2
	V	0	2	0,2-1
Bote Motor potencia	H	1	sin limite	1,2
	V	0	3,5	0-2,2

El estudio realizado por Mosley (1983) en ríos pertenecientes a Nueva Zelanda también propone profundidades, velocidades y anchos de flujos mínimos, máximos y preferidos para actividades recreativas con y sin contacto en agua, en Tabla 2 se presentan las actividades recreativas de interés para el presente estudio. Se observa que los resultados muestran una alta similitud con los propuestos por Hyra (1978).

Tabla 2: Requerimientos hídricos para actividades con contacto directo (Mosley, 1983)

Actividad	Requerimientos hídricos: Ancho superficial (W) [m], Profundidad (H) [m], Velocidad (V) [m/s]			
		Mínimo	Máximo	Óptimo
Nado	W	5		>10
	H	0,8		1,5
	V		1	<0,3
Balsas	W	5		20
	H	0,3		0,8-1,5
	V			1,0-2,0
Rafting/canoas (aguas blancas)	W	7,5		>20
	H	0,2	1,2	0,8-1,5
	V		4,5	1,0-3,0
Pesca de Orilla	W			
	H		1,2	0,4-0,6
	V		1,8	<0,5
Pesca con caña de orilla	W			Hábitat de peces
	H			Hábitat de peces
	V			Hábitat de peces
Pesca con caña desde bote	W	7,5		>7,5
	H	0,3		0,6-1,5
	V		3	<1,5
Botes a remo, canoa plana	W	7,5		>20
	H	0,5		0,6-1,5
	V		1,5	<0,5
Velerismo	W	30		>60
	H	0,8		>1,5
	V		0,5	0
Bote plano con motor baja potencia	W	7,5		>30
	H	0,6		>1,5
	V		3	<1,5
Bote plano con motor alta potencia, ski en agua	W	30		>90
	H	1,5		3
	V		4,5	<1,5
Jetboat	W	5		>5
	H			>0,6
	V		4,5	<4,5

Shelby et al. (1992) obtiene la relación entre la calidad de ciertas actividades recreativas como kayak, rafting y canoa en función del flujo disponible en el río Dolores, usando el

método de encuestas a usuarios expertos. En la Figura 2 se pueden observar los resultados obtenidos. Se establece que las condiciones mínimas para realizar las actividades recreativas están representadas por el nivel número 3 en el cual se cruza límite entre lo considerado como un caudal satisfactorio para practicar la actividad y uno no satisfactorio.

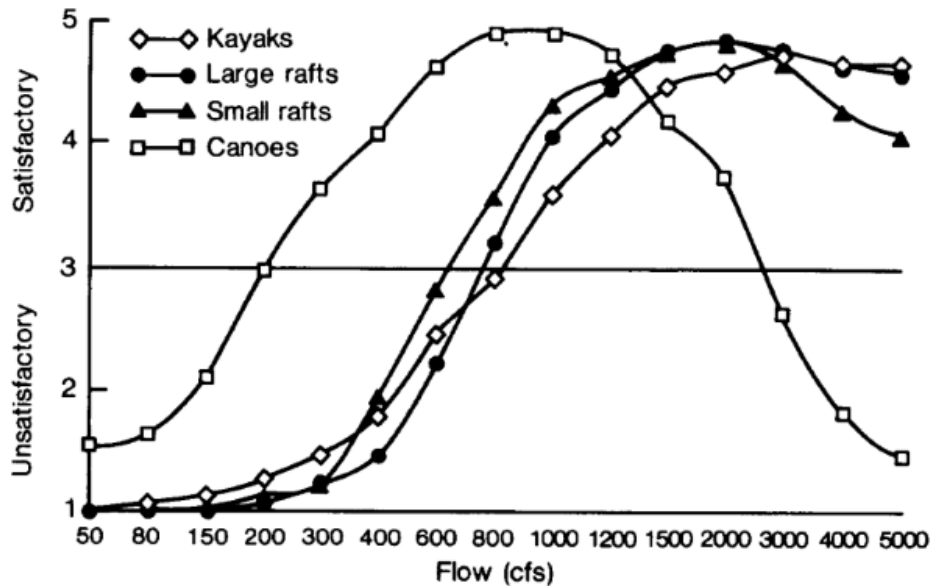


Figura 2: Fuente Shelby et al. (1992)

Más recientemente, Whittaker & Sheby (2002) proponen un método para relacionar la calidad de una cierta recreación con el flujo, en donde las curvas son desarrolladas a partir de distintos métodos, los cuales toman las evaluaciones agregadas de personas sobre la calidad de una cierta recreación dado un rango específico de caudales. Dentro de estos métodos se encuentran, juicios a expertos y encuestas a usuarios. Las complicaciones que pueden tener estos métodos son que las personas no siempre saben el caudal que experimentaron, no son sensibles a como los cambios de flujo afectan la actividad recreativa, pueden responder estratégicamente y que las preferencias de las personas varían. La Figura 3 muestra una situación hipotética de la calidad de la recreación en función de la cantidad de flujo. Se puede observar el rango aceptable donde es posible realizar la actividad, el rango óptimo en donde la actividad se ve mayormente beneficiada y la línea marginal, la cual indica que por sobre esta las actividades se pueden desarrollar y por bajo esta línea la calidad de la recreación es inaceptable. Luego para caudales menores al flujo bajo marginal y mayores al flujo alto marginal, no es posible garantizar la práctica de la actividad evaluada.

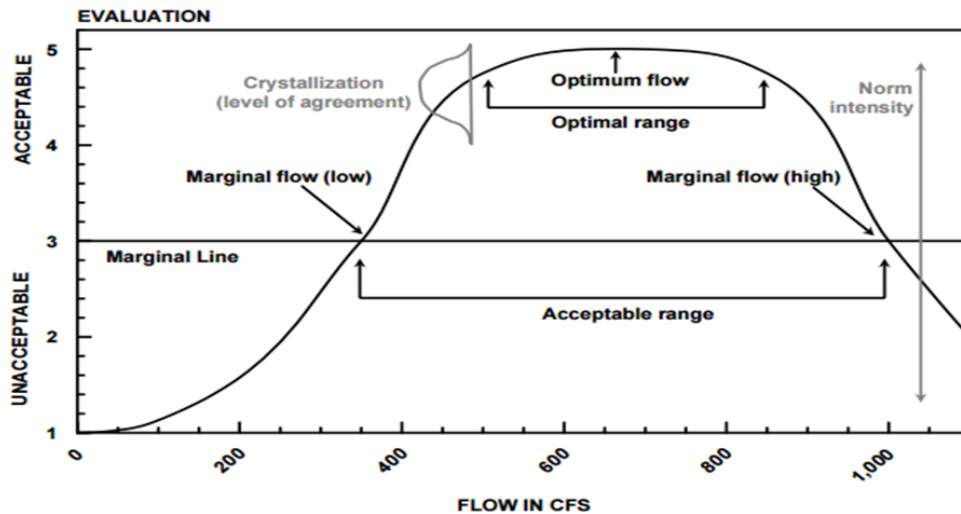


Figura 3: Fuente Doug Whittaker & Shelby (2002)

En cuanto a la valoración del paisaje, varios autores Shelby et al (1992), Whittaker & Shelby (2002), DGA (2010), Whittaker & Shelby (2013), proponen el método de encuestas a usuarios en donde a partir de imágenes o videos del paisaje con distintos niveles de caudal, el encuestado puede evaluar la calidad de este.

El estudio DGA (2010) propone varios métodos para obtener caudales apropiados para las actividades recreativas de uso público no extractivo, con la finalidad de obtener los caudales de reserva turísticos. Dentro de estos métodos, se proponen los modelos numéricos, encuestas a los usuarios y juicio de expertos. El segundo de estos generalmente es el más eficaz para evaluar cuantitativamente los caudales para la práctica de actividades recreativas y el último de los mencionados corresponde al método más común para evaluar el efecto directo del caudal sobre la recreación y además para validar los resultados obtenidos por otros medios. El método de modelos numéricos relaciona las condiciones para la práctica de una cierta actividad recreativa con el caudal por medio de una relación matemática. Estos corresponden al método de flujo mínimo para canotaje y el Método de Tennant (1976) también conocido como Método Montana el cual asume que un porcentaje del flujo medio anual es necesario para mantener un flujo ambiental saludable.

Finalmente de estudios realizados por USACH (2016), el manual de curvas de preferencia para la realización de actividades recreativas propone niveles de altura y velocidad preferibles para los usuarios para realizar las actividades de pesca en orilla, kayak y baño a partir de encuestas y entrevistas a usuarios directos del cauce. Para el caso de la pesca se encuestó a los pescadores, para el caso del Kayak se obtuvo información de agrupaciones y asociaciones que desarrollan la actividad, y para el baño se encuestó a usuarios del cauce en temporada de verano de manera directa. A continuación se describen los resultados obtenidos por estas curvas de preferencia de profundidad y velocidad para el caso de la pesca de orilla, kayak y nado.

- Resultados curva de preferencia pesca de orilla: Las curvas ilustran que los usuarios prefieren mayormente una profundidad entre los 0.6 y 0.8 metros y a los 2 metros la preferencia pasa a ser nula. En cuanto a la velocidad se observa que la máxima preferencia se encuentra entre el rango de 0.45 y 0.75 metros por segundo.
- Resultados curva de preferencia kayak: Las curvas ilustran que los usuarios prefieren mayormente una profundidad tal que el nivel del agua cubra al usuario, luego la mayor preferencia ocurre a partir de los 1.65 metros hasta los 1.75 metros. La profundidad mínima preferida es a los 0.8 metros. Por sobre los 2 metros la preferencia son cercanas a cero.
- Resultados curva de preferencia nado: Las curvas ilustran que los usuarios prefieren mayormente una profundidad de 1.4 metros. Por sobre los 2 metros la preferencia es cercana a cero. En cuanto a la velocidad se observa que la máxima preferencia se encuentra entre el rango de 0 a 0.45 metros por segundo, por sobre una velocidad de 1 metro por segundo la preferencia es nula.

2.3 Métodos de asignación óptima entre usos in situ y usos extractivos

Es recomendable que la asignación del agua entre los distintos usos que compiten entre sí debe ser analizada con técnicas económicas, es decir, análisis de costo beneficio. (Robert A. Young, 2005). Sin embargo, el beneficio económico de los usos in situ no siempre es posible de obtener.

Estudios han demostrado que los valores económicos de usos de agua en ríos se pueden estimar y comparar con el valor de usos extractivos. En donde el beneficio marginal de usos in situ puede ser igual o mayor al beneficio marginal de usos extractivos. Es decir, el valor de los usos in situ son suficientes como para ser comparados con usos extractivos (Ward, 1987). En el caso de aquellos usos que no se pueden valorar económicamente existen otros métodos como el costo de oportunidad, este se entiende como los beneficios económicos a los que se renuncia al elegir otra alternativa.

En consecuencia si no existe información disponible para poder obtener beneficio económico de usos in situ del cauce, se propone evaluar el costo de oportunidad de usos extractivos, es decir, el beneficio económico al que se renuncia por mantener una cierta cantidad de agua en el cauce que permita que los usos in situ se vean mayormente beneficiados.

El enfoque metodológico de la presente memoria para estudiar los *tradeoffs* entre usos extractivos de agua y usos recreativos se basa en los estudios de (Cardwell, 1992), ya que propone un modelo de optimización para analizar los *tradeoffs* entre los usos extractivos del agua y el uso in situ del agua destinado a la conservación del ecosistema. En este modelo genera varias alternativas de flujos mínimos a mantener en cauce para distintos tipos de años con el fin de satisfacer dos objetivos, minimizar el déficit de agua demandado para usos extractivos y maximizar la población de peces a partir del indicador de curvas de capacidad de hábitat. El método combina ambos objetivos asignándole a cada uno distintas ponderación e incorporando restricciones asociadas al mínimo flujo para peces y a las extracciones. Los resultados del modelo presentan cuatro soluciones, cada una con distintas ponderaciones asignadas a los objetivos. Para cada solución se obtiene la capacidad de hábitat y el déficit de agua para uso extractivo en un año seco, normal, húmedo y crítico.

3 METODOLOGÍA PROPUESTA

En el presente capítulo se presenta la metodología general propuesta para analizar los *tradeoffs* entre usos recreativos in situ y usos extractivos del agua. En la Figura 8 se presenta un diagrama de flujo de la metodología.

3.1 Beneficio actividades recreativas en función de variables hidrológicas

En esta sección se presenta una metodología para medir a partir de diversos indicadores los beneficios cualitativos de actividades recreativas en función de variables hidrológicas.

Los indicadores o métodos escogidos para estimar el beneficio de los usos recreativos en los cauces se basaran principalmente en la información disponible para su aplicación. Es por esto que los métodos económicos no serán utilizados para el desarrollo del presente trabajo, ya que no se cuenta con datos pertinentes sobre registros de viajes ni encuestas a usuarios sobre su disposición a pagar por cierta calidad de recreación en ríos.

En consecuencia, para fines de la presente memoria se utilizan los resultados del estudio realizado por USACH (2016) basado en encuestas a usuarios sobre calidad de actividades recreativas y los estudios sobre criterios de requerimientos hídricos para actividades recreativas realizados por Hyra (1978) y Mosley (1983) para medir los beneficios de usos in situ en cauces. Es importante mencionar que si bien estos dos últimos estudios no son recientes son bastante citados y/o usados por otros más actuales tales como; Shelby (1992), Jowet (1997), DGA (2010) y CEA (2013). El estudio realizado por USACH (2016) sólo incluye las actividades de pesca de orilla, kayak y nado, por lo tanto las actividades restantes se guiaran únicamente por los estudios de requerimientos hídricos. La Tabla 3 presenta los requerimientos hídricos adoptados en este estudio para las diversas actividades mencionadas, en la cual se integran los resultados de los tres estudios recién mencionados.

Es importante mencionar que el régimen y las características geomorfológicas naturales del cauce establecerán si éste es apto para desarrollar ciertas actividades recreativas independientes de la cantidad de agua que se mantenga en el río. Es decir, un cauce puede tener o no potencial para desarrollar actividades in situ, y en caso de tenerlo, sólo algunas actividades podrán desarrollarse, en efecto estas deberán presentar criterios de requerimiento hídricos similares.

Tabla 3: Requerimientos hídricos actividades recreativas

Actividad	Requerimientos hídricos: Ancho superficial (W) [m], Profundidad (H) [m], Velocidad (V) [m/s]			
		Mínimo	Máximo	Óptimo
Nado	W	5		>10
	H	0.8	sin limite	1,2-1,5
	V	0	1	<0.45
Balsas	W	5		20
	H	0.3	sin limite	0,8-1,5
	V	0	2.5	1,0-2,0
Rafting/kayak	W	7.5		>20
	H	0.8	sin limite	1,5-1.75
	V	0.5	4.5	1,0-3,0
Pesca de Orilla	W			
	H	0.2	1.2	0,6-0,8
	V	0	1.8	0,45-0,75
Pesca con caña de orilla	W			hábitat de peces
	H			hábitat de peces
	V			hábitat de peces
Pesca con caña desde bote	W	7.5		>7,5
	H	0.3	sin limite	0,6-1,5
	V	0	3	0,5-1,5
Botes a remo, canoa plana	W	7.5		>20
	H	0.5	sin limite	0,6-1,5
	V	0	1.5	<0,5
Velerismo	W	30		>60
	H	0.8	sin limite	>1,5
	V	0	0.5	~0
Bote con motor baja potencia	W	7.5		>30
	H	0.6	sin limite	>1,5
	V	0	3	0,2-1,5
Bote plano con motor alta potencia, ski en agua	W	30		>90
	H	1.5	sin limite	~3
	V	0	4.5	0,2-1,5

Para poder evaluar el beneficio cualitativo (no económico) generado por las distintas actividades recreativas en función de las variables hidráulicas se definen niveles específicos de calidad de la recreación (Tabla 4) basándose en los propuestos por Shelby et al. (1992) y Whittaker & Shelby (2002). Se especifica que el nivel 3 corresponde al mínimo para garantizar la práctica de las actividades, el nivel 5 corresponde al óptimo, es decir, nivel en donde las actividades se ven mayormente beneficiadas y los niveles bajo

3 se considera que la calidad de la recreación es insatisfactoria. Por consiguiente, la Tabla 3 se relaciona con la Tabla 4 estableciendo que los valores máximos y mínimos definidos en Tabla 3 definen el rango aceptable (nivel 3) y los valores óptimos definen el nivel de mayor beneficio (nivel 5). En consecuencia las condiciones mínimas para garantizar que las actividades recreativas se puedan practicar están representadas por el nivel número 3 (aceptable). Bajo este límite la calidad de la recreación se define insatisfactoria y por ende no es posible garantizar una adecuada práctica de ésta.

Tabla 4: Beneficio Recreación

Nivel de calidad de actividad recreativa	
1	Muy insatisfactorio
2	insatisfactorio
3	Aceptable
4	satisfactorio
5	Óptimo

A partir de la Tabla 3 se confeccionan las curvas de beneficio de las distintas actividades de recreación en cauces naturales en función de la velocidad y la altura en el río. Recordando que los valores mínimos, máximos y óptimos corresponden a los niveles de calidad 3, 3 y 5 respectivamente. Las alturas y velocidades no definidas en las Tabla 3, es decir, que no están ligadas a un nivel específico de calidad, se asocian a puntos (niveles no definidos) que se encuentran entre los niveles de calidad definidos en Tabla 4 y se obtienen mediante interpolación lineal. Aquellos casos en donde la velocidad máxima no tiene límite se asocia a que por sobre los dos metros el beneficio es aceptable (nivel 3) bajo el supuesto que una altura de agua por sobre los dos metros cubre por completo a todo usuario posible del cauce. Las alturas nulas se asocian a un nivel muy insatisfactorio (nivel 1) debido a que impiden la práctica de cualquier actividad.

Finalmente se obtienen las curvas de beneficio cualitativo para las actividades de nado, pesca de orilla, bote a remo, kayak y rafting, balsa y pesca desde bote en función de variables hidráulicas (ver Figuras 4 y 5).

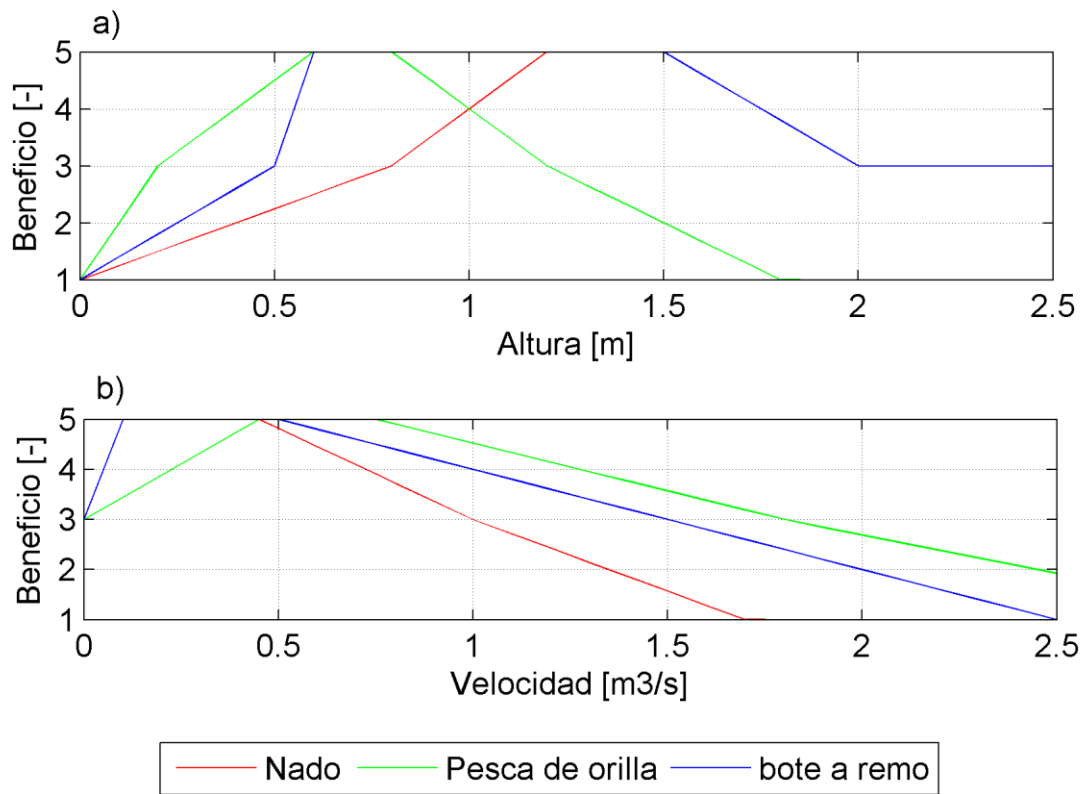


Figura 4: Curvas de beneficio para actividades recreativas de Nado, Pesca de orilla y Bote a remo en cauces de baja velocidad y altura.

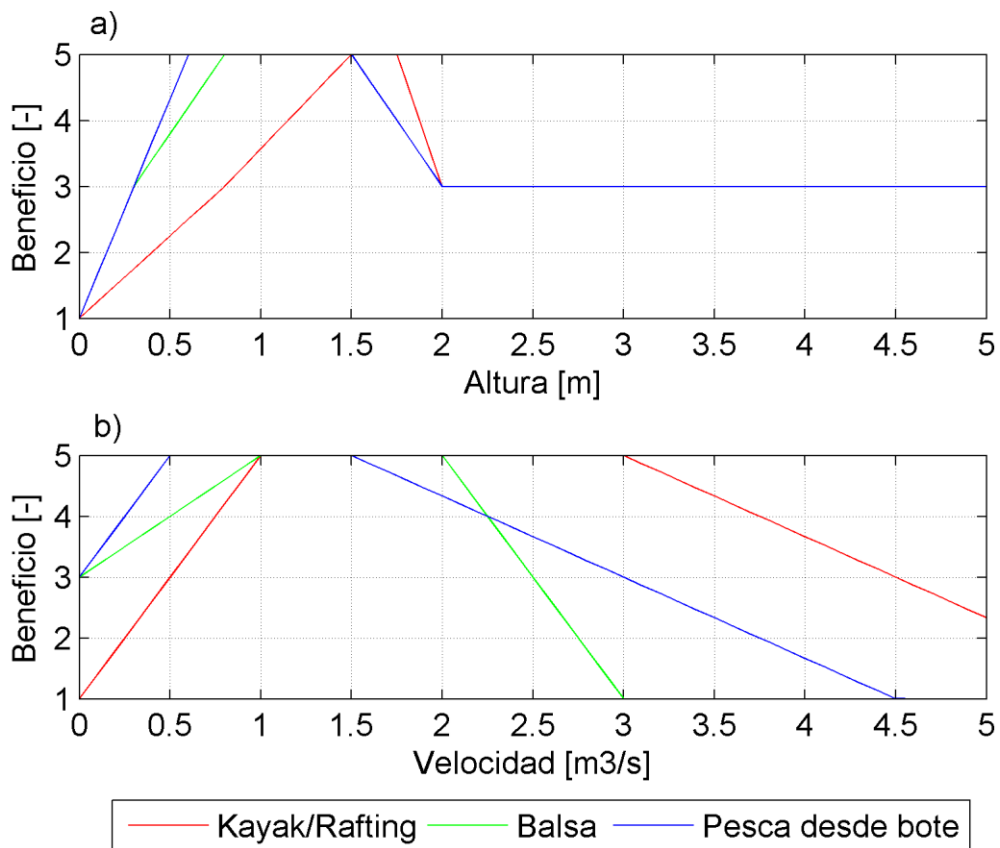


Figura 5: Curvas de beneficio para actividades recreativas de Kayak/Rafting, Balsa y Pesca desde Bote en cauces de velocidad y altura media.

3.2 Antecedentes caso de estudio

Se deben identificar los usos in situ y usos extractivos consuntivos y no consuntivos que entran en conflicto en la zona de estudio.

Los antecedentes necesarios para la aplicación del método son los siguientes:

- Identificación tramos de río donde se desarrollan usos in situ.
- Ubicación perfiles topobatimétricos del río en estudio.
- Eje hidráulico de cada perfil.
- Puntos de captación y restitución usos extractivos.
- Derechos de agua otorgados.
- Datos fluviométricos de la zona de estudio.
- Caudales ecológicos.
- Antecedentes para estimar beneficio económico de usos extractivos.

3.3 Beneficios usos in situ recreativos en función del caudal

La obtención del beneficio de las actividades recreativas en función del caudal depende de las características del cauce, debido a que se debe estudiar la relación entre el caudal, la velocidad y la altura en todos los perfiles topobatimétricos pertenecientes al río a partir de información disponible de ejes hidráulicos. Para así generar curvas de beneficio cualitativo de actividades recreativas en el cauce en función del caudal para cada perfil.

Para lo anterior se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Obtener la altura en función del caudal $H(Q)$, y la velocidad en función del caudal $V(Q)$ para cada perfil a partir de los datos de ejes hidráulicos.
- 2) Obtener beneficio cualitativo de recreación en función de la altura y velocidad que a la vez dependen del caudal $B(H(Q))$ y $B(V(Q))$ para cada perfil a partir de lo obtenido en sección 3.1.
- 3) Obtener beneficio cualitativo de recreación en función del caudal para cada perfil $B(Q)$. Se establece que el beneficio en función del caudal corresponde al menor entre el beneficio asociado a la altura y velocidad.
- 4) Integrar resultados obtenidos de beneficio cualitativo de usos in situ recreativos en función del caudal para cada perfil a partir de indicadores para representar el beneficio cualitativo de estas actividades en función del caudal pasante en todo el tramo estudiado. Los indicadores utilizados son los siguientes:
 - Beneficio crítico: Para cada caudal se registra valor de beneficio de perfil que presenta menor nivel de calidad.
 - Beneficio promedio: Para cada caudal se registra el beneficio promedio de todos los perfiles.
 - Porcentaje de perfiles con nivel de calidad sobre aceptable: Se registra el porcentaje de perfiles respecto al total de estos que presenta un nivel de calidad por sobre o igual a 3 (aceptable).
 - Porcentaje de perfiles con nivel de calidad sobre satisfactorio: Se registra el porcentaje de perfiles respecto al total de estos que presenta un nivel de calidad por sobre o igual a 4 (satisfactorio).

- Kilómetros continuos de río con nivel de calidad sobre aceptable: Se obtiene la cantidad máxima de perfiles continuos con nivel por sobre o igual a 3.

3.4 Beneficios usos extractivos en caso de estudio

Estimar el beneficio económico y marginal mensual de los usos extractivos que entran en conflicto con usos in situ en función del caudal captado a partir de los antecedentes recopilados referentes a los usos extractivos.

3.5 Relación entre caudales medios mensuales en río y caudales captados por usos extractivos

Calcular los caudales medios mensuales en el río en estudio bajo la influencia de extracciones de agua sujetas a limitaciones en las captaciones. Es decir, ponderando el derecho de aprovechamiento de agua en cada punto de captación por un porcentaje, el cual tomará valores entre cero y 100. Estos caudales medios mensuales se estiman para una escala temporal cercana a 30 años y se evalúan en cuatro escenarios definidos en función de las probabilidades de excedencia asociadas al caudal medio anual o a las de caudales medios mensuales. Los escenarios evaluados son los siguientes.

Escenarios de una hidrología real, de tipo seca y normal, para un año, representadas por los registros mensuales observados asociados a un año donde se observa que su caudal medio anual es similar a los valores obtenidos de un análisis de frecuencia de dicha variable, con una probabilidad de excedencia de 85% y 50% respectivamente.

Escenarios de una hidrología sintética, de tipo seca y normal, para un año, representadas al tomar los caudales mensuales asociados a las probabilidades de excedencia de 85% y 50% respectivamente, desde los análisis de frecuencia realizados independientes para cada mes.

Se obtiene relación entre caudal extraído y caudal mantenido en el cauce para cada valor de porcentaje aplicado durante los cuatro escenarios mencionados. De esta manera se tiene la incidencia de estas limitaciones en el beneficio de los usos recreativos y extractivos al evaluar el beneficio de los usos in situ recreativos asociado al caudal mantenido en cauce y el beneficio del uso extractivo asociado al caudal captado.

3.6 Curva de oferta usos in situ recreativos

Si bien en economía la curva de oferta en un mercado está definida por los costos marginales de producción, para el caso de la presente memoria los costos marginales se asocian al costo de oportunidad de no utilizar el agua para usos extractivos para ser aprovechada por usuarios de actividades recreativas en el río.

La curva de oferta corresponde a la curva de beneficio marginal mirada de derecha a izquierda. Es decir, si se tiene un caudal Q^* en situación sin extracciones de agua en el río en estudio, a partir de los cálculos realizados en sección anterior se tiene la relación entre caudal extraído (Q_{out}^*) y caudal mantenido en río (Q_{rio}^*) para diferentes niveles de extracción. Luego la curva de oferta inicia en punto de curva de beneficio marginal que corresponde a la extracción máxima ($Q_{rio}^*(\max Q_{out}^*)$) y finaliza en punto de curva de beneficio marginal asociada a una extracción nula (Q^*). Las Figuras 6 y 7 explican lo anterior.

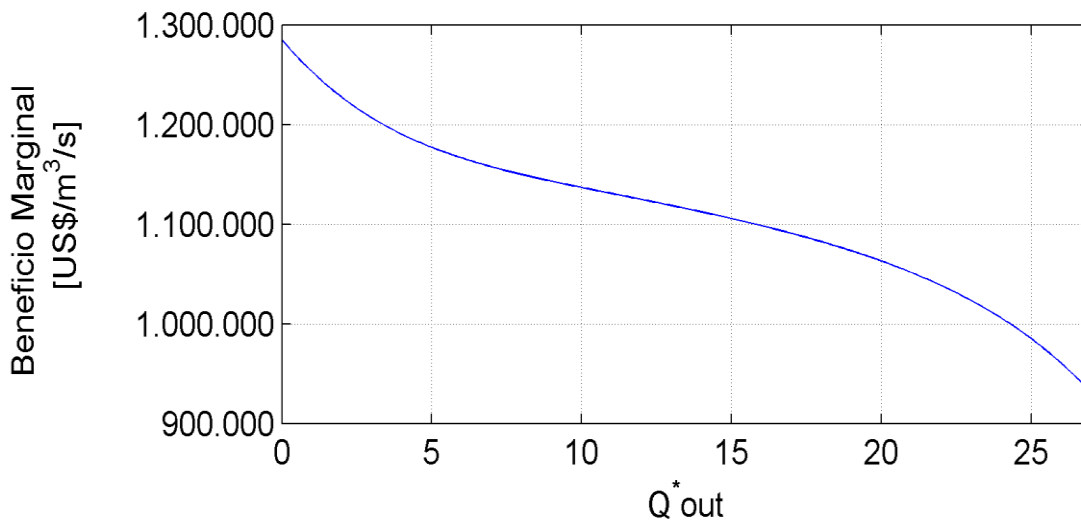


Figura 6: Curva de beneficio marginal explicativa

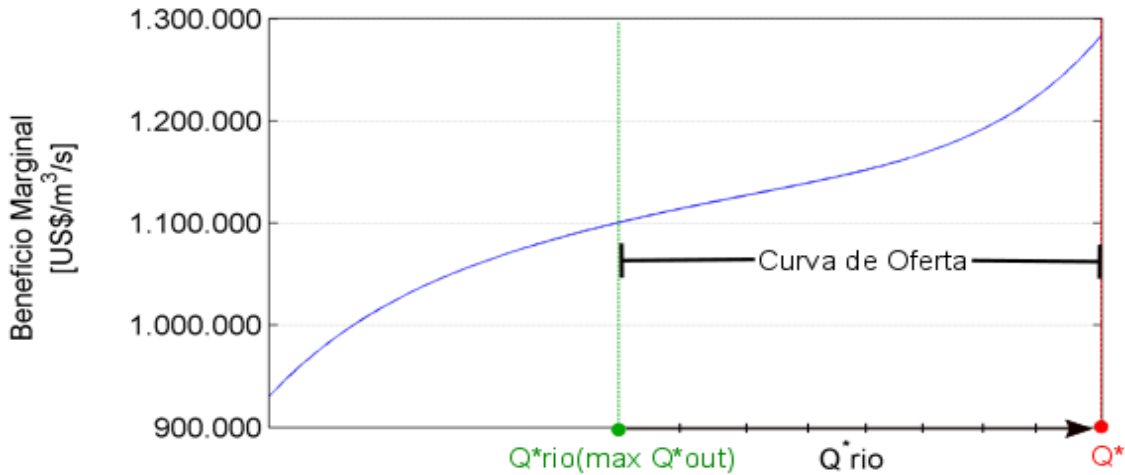


Figura 7: Curva de oferta explicativa

3.7 Asignación óptima entre usos in situ y usos extractivos

El método propuesto para evaluar los *tradeoffs* entre usos in situ recreativos y usos extractivos del agua se basa en el enfoque propuesto por (Cardwell, 1992). Donde, se propone encontrar asignaciones eficientes de agua para usos de conservación del ecosistema y usos extractivos.

La presente memoria propone que la integración de la curva de oferta obtenida a nivel mensual y el beneficio cualitativo de los usos in situ recreativos en función del caudal pasante en tramo de estudio permite determinar las asignaciones eficientes de caudal medio mensual entre los usos in situ y usos extractivos. Las asignaciones se consideraran eficientes cuando no es posible mejorar un uso sin perjudicar el otro. En consecuencia, una asignación es mejor a otra cuando es posible disminuir el costo de oportunidad de uso extractivo sin perjudicar el beneficio cualitativo de los usos in situ recreativos.

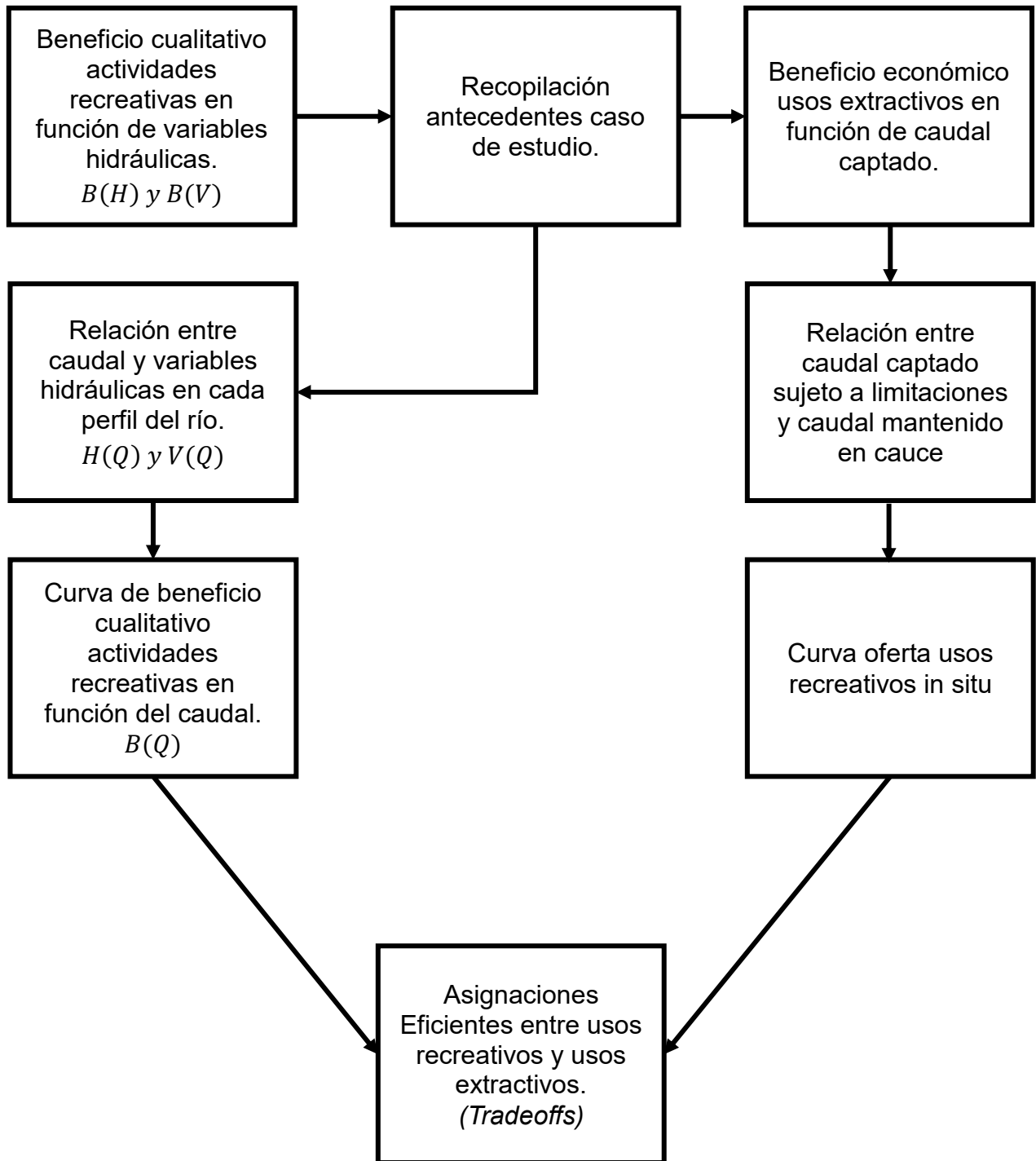


Figura 8: Diagrama de flujo metodología

4 CASO DE ESTUDIO

4.1 Recopilación antecedentes subcuenca Alto Maipo

La Subcuenca de Alto Maipo se encuentra localizada al sur-este de Santiago de Chile, en la comuna de San José de Maipo, Provincia Cordillera, Región Metropolitana en la cuenca alta del Río Maipo (Ver Figura 9).

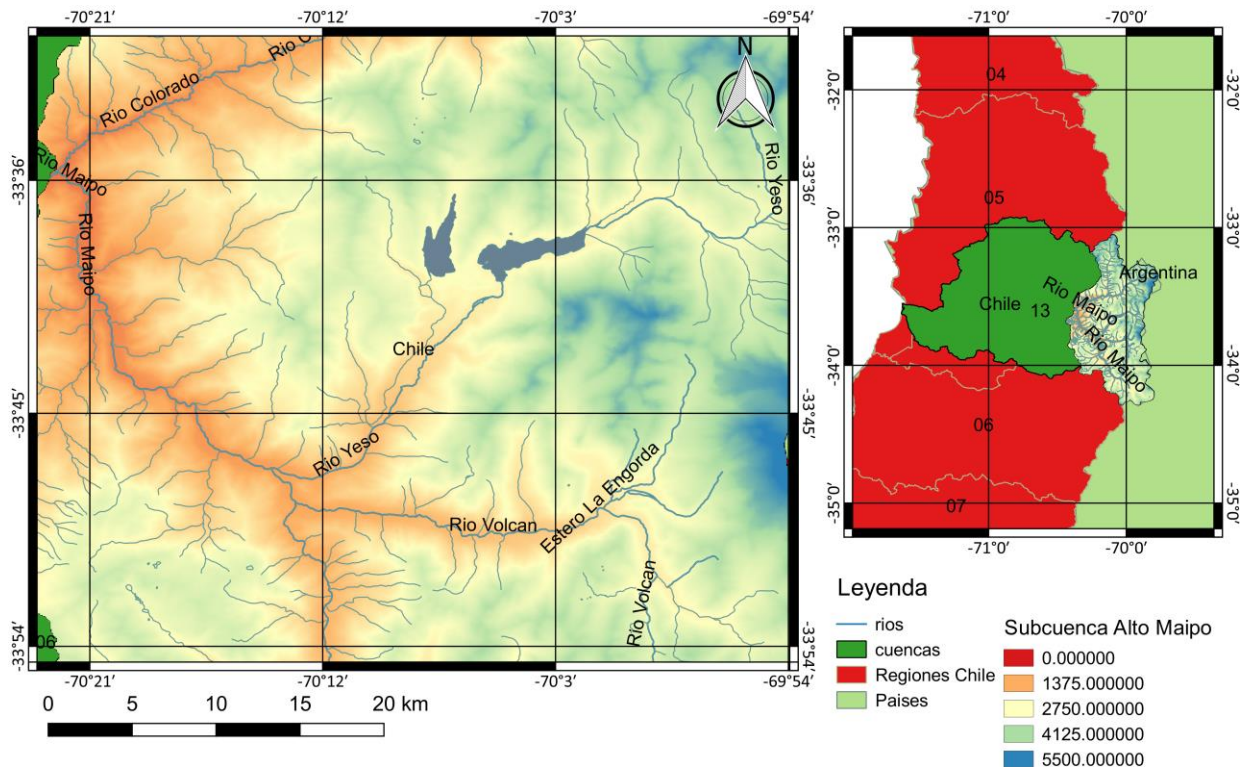


Figura 9: Subcuenca Alto Maipo.

Para la realización de la presente memoria se contó con los antecedentes recopilados de la información pública disponible en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo. Para fines de este estudio la información recopilada corresponde a datos fluviométricos de los cauces, las actividades recreativas, los proyectos presentes y futuros que implican extracción de agua, los caudales ecológicos de cauces de importancia y los derechos de aprovechamiento de agua otorgados en la subcuenca de Alto Maipo.

4.1.1 Usos in situ

Principalmente se realiza las actividades de kayak y rafting en el río Maipo, desde desembocadura del río Yeso hasta San José de Maipo (sector parque los héroes) en los meses de octubre a abril. Además se practica pesca de orilla en río Yeso desde la desembocadura del Embalse el Yeso hasta confluencia con río Maipo (ver Figura 10). Sin embargo, esta misma actividad es posible realizarla en otros cauces cercanos al lugar, por ende no se considera para la asignación de agua entre usos extractivos y usos in situ en el tramo de río en estudio.

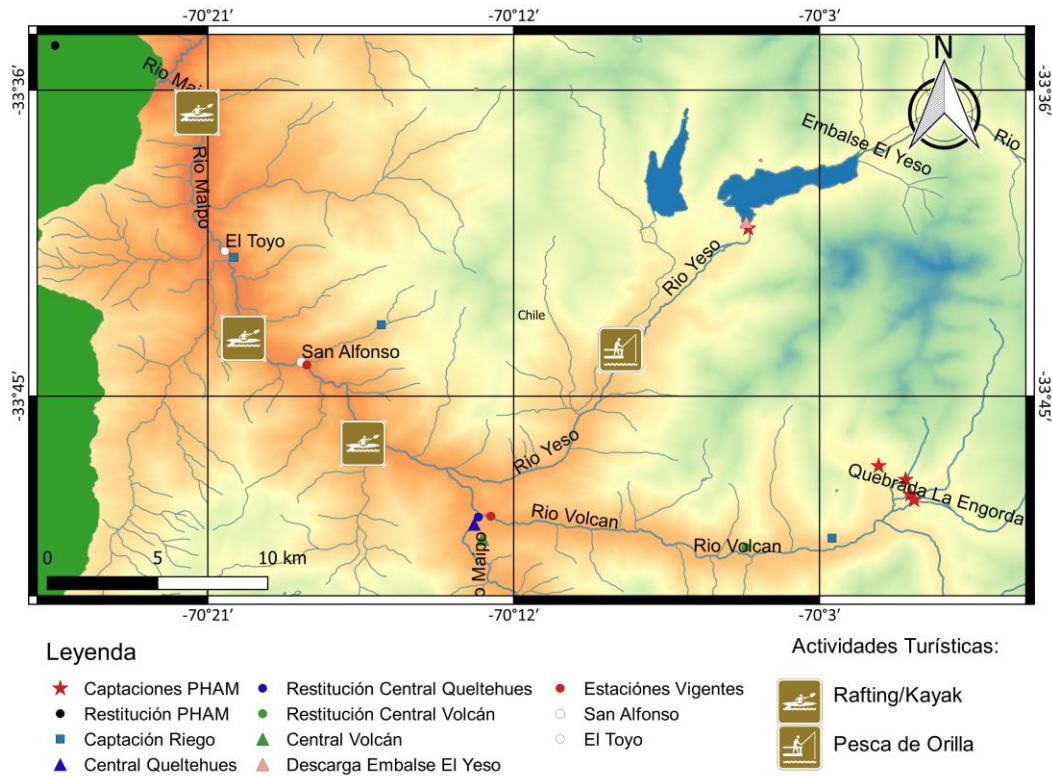


Figura 10: Usos in situ y usos extractivos en río Maipo.

4.1.2 Perfiles topobatimétricos

Se obtiene la ubicación de perfiles topobatrimetricos en secciones de cauce en donde se tienen usos in situ. En la sección del río Maipo en la cual se realizan actividades de rafting y kayak se dispone de 113 perfiles separados unos de otros por aproximadamente 300 metros. El largo total de la sección se estima de 34 km (ver trazado rojo Figura 11). Para el caso del río Yeso, solo se tomo en cuenta el primer tramo aguas abajo del embalse El Yeso, en donde es posible considerar que los aportes son exclusivamente de las descargas de éste. Se utilizaron 86 perfiles (ver trazado verde Figura 11).

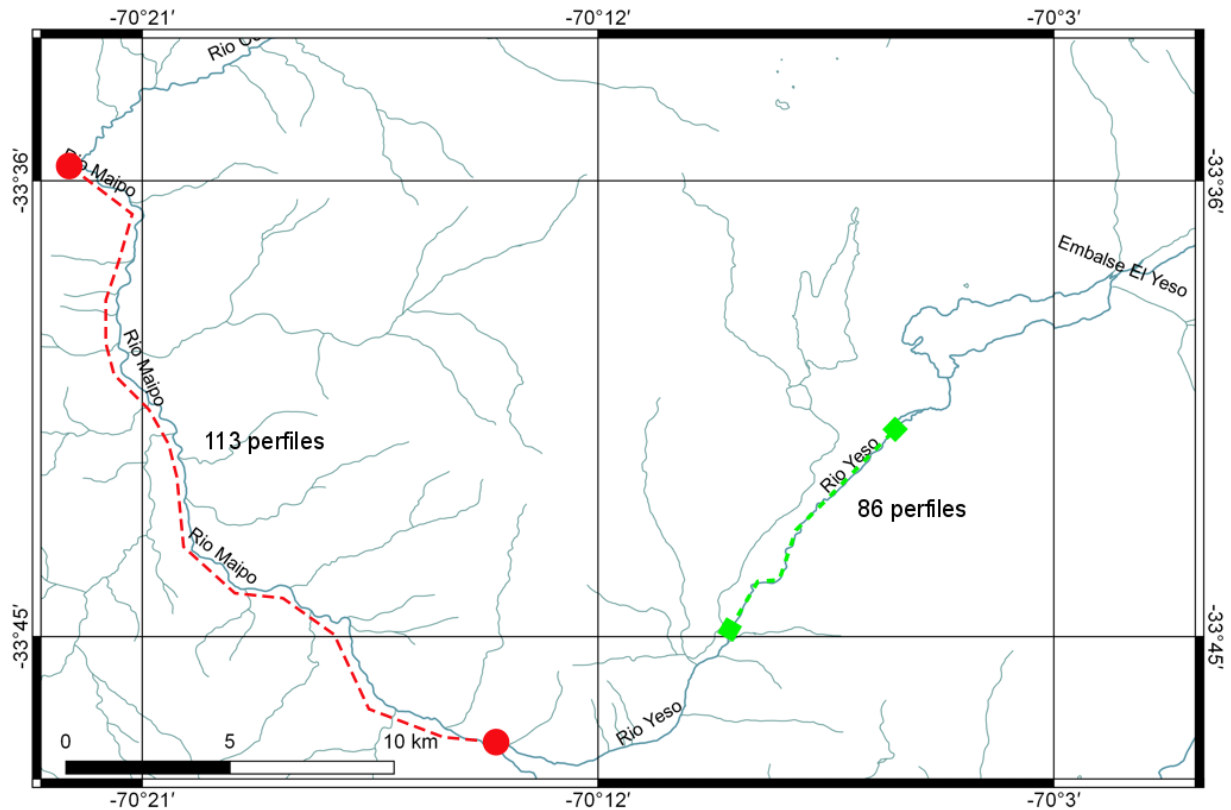


Figura 11: Ubicación perfiles topobatimétricos.

4.1.3 Eje hidráulico

Para cada uno de los perfiles topobatimétricos se recopilan los datos de los ejes hidráulicos correspondientes, en CEA (2013). En específico, la información utilizada corresponde a los velocidades, alturas y caudales de los 113 ejes hidráulicos. La altura se obtiene de la resta entre columna *Min Ch El* y columna *W.S. Elev* que corresponden a cota fondo y cota del eje hidráulico respectivamente. En Anexo A se observa ejemplo de eje hidráulico para un perfil en sección río Maipo.

4.1.4 Usos extractivos (ubicación puntos de captación y restitución)

Actualmente los recursos hídricos pertenecientes a Subcuenca Alto Maipo son utilizados para usos extractivos consuntivos y no consuntivos como generación hidroeléctrica, agua potable y riego. La Figura 10 muestra la ubicación de los puntos de captación y restitución de los usos extractivos que se encuentran en operación y construcción.

1. Usos extractivos en situación Actual

Riego:

Las tablas 5, 6 y 7 muestran los derechos de aprovechamiento de agua otorgados para uso de riego obtenidos de la información pública de derechos de aprovechamiento de agua otorgados en la DGA (DGA, 2015).

Tabla 5: Derecho de aprovechamiento para riego sector río Volcán

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1.17	1.15	1.11	0.42	0.35	0.66	1.12	1.37	0.77	1.1	1.34	1.95

Tabla 6: Derecho de Aprovechamiento para Riego en Estero San Alfonso

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016

De la Tabla 6 se observa que los caudales otorgados en Estero San Alfonso son despreciables.

Tabla 7: Derecho de Aprovechamiento para Riego en Estero Coyanco (sector el Toyo)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071

De la Tabla 7 se observa que los caudales otorgados en Estero Coyanco son despreciables.

Hidroelectricidad:

Derecho de Aprovechamiento para Central Queltehues: la restitución se sitúa aguas arriba de sector río Maipo en estudio, por ende no afecta las actividades recreativas.

Derecho de Aprovechamiento para Central Volcán: la restitución se sitúa aguas arriba de sector río Maipo en estudio, por ende no afecta las actividades recreativas.

Agua Potable:

Embalse el Yeso: El embalse entró en operación en el año 1967, éste recibe las aguas provenientes del río Yeso. El caudal descargado por el embalse fluye por el río Yeso hasta llegar al río Maipo siguiendo su curso hasta llegar a los puntos de captación en las plantas de producción de agua potable. Las aguas descargadas por el embalse constituyen un aporte de caudal a la zona donde se efectúan actividades recreativas. Por otro lado, el embalse se ha operado para satisfacer distintos usos a lo largo del tiempo. Desde 1967 a 1978 se usó para riego y agua potable, desde 1978 a 1993 se usó preferentemente para agua potable y finalmente desde 1993 en adelante su uso es exclusivo para agua potable (ver Figura 12).

Con el objeto de representar adecuadamente el régimen actual del río Yeso se consideraran los registros de operación del Embalse a partir del año 1978 obtenidos de CONIC-BF (2008).

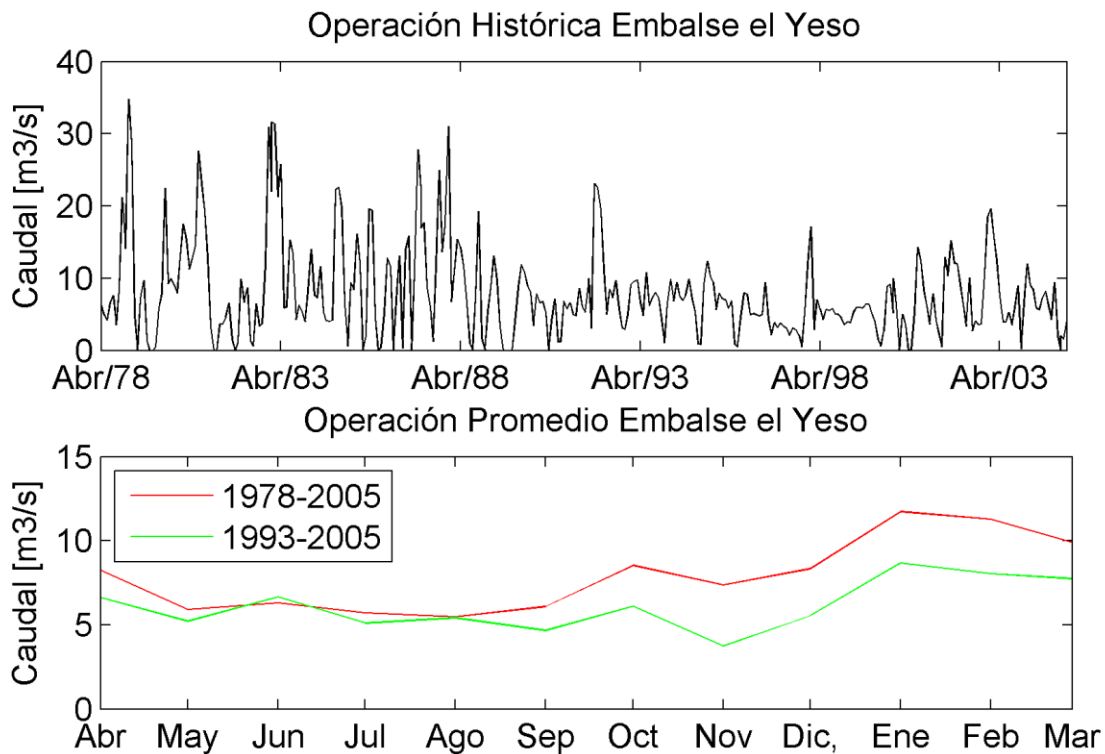


Figura 12: Operación Embalse El Yeso

2. Usos extractivos situación futura

El Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM) se encuentra en etapa de construcción y se estima que comenzará a operar el año 2018. Las captaciones del proyecto que afectan la realización de actividades recreativas por pertenecer a flujos de agua afluentes a sección río Maipo en estudio se efectuarán en Estero Colina, Estero La Engorda, Cajón del Morado, Quebrada las Placas y Río Yeso en Desembocadura Embalse. La restitución de estas captaciones se sitúa aguas abajo de la zona apta para actividades recreativas, en efecto el proyecto afecta los usos in situ del cauce.

Tabla 8: Derechos de Aprovechamiento de Agua para PHAM [m³/s]. Fuente AES Gener (2008)

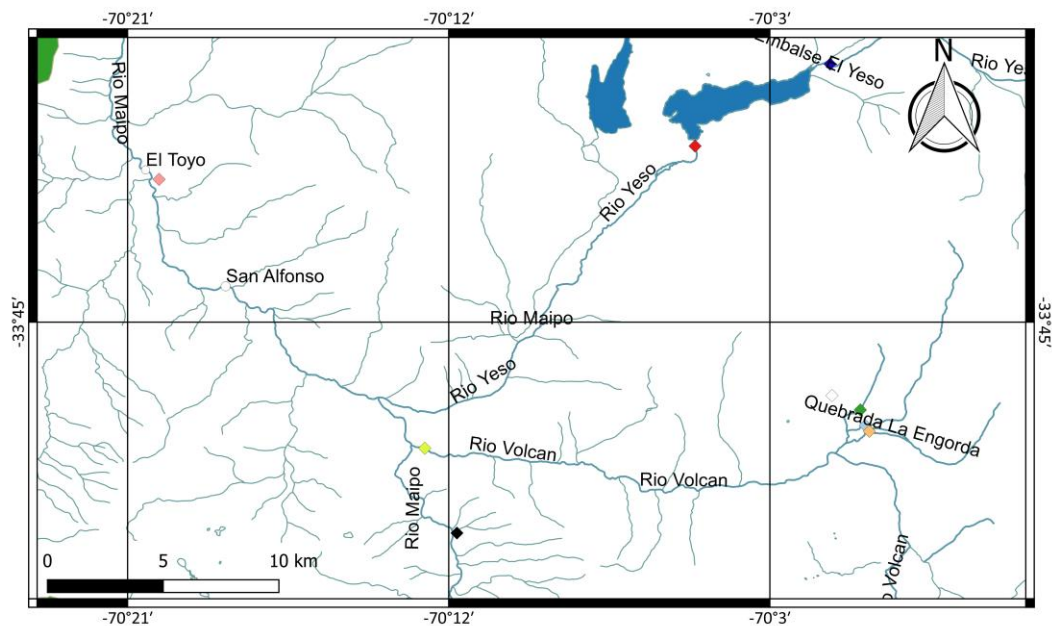
Mes	Cajón del Morado	Estero Las Placas	Estero Colina	Estero La Engorda	Río Yeso
Enero	3.7	1	6	2.1	15
Febrero	3.45	1	4.21	2.1	15
Marzo	2.31	1	2.82	1.96	15
Abril	1.4	0.84	1.71	1.18	15
Mayo	1.07	0.64	1.31	0.91	15
Junio	0.97	0.57	1.17	0.81	15
Julio	1.02	0.46	1.24	0.87	15
Agosto	0.87	0.59	1.06	0.73	15
Septiembre	0.99	0.9	1.2	0.83	15
Octubre	1.49	1	1.82	1.26	15
Noviembre	2.76	1	3.36	2.1	15
Diciembre	3.7	1	5.54	2.1	15

4.1.5 Datos fluviométricos cauces

Con el objetivo de obtener el régimen natural, el régimen en la situación actual y el proyectado (proyectos aprobados extractivos en operación), se utilizó el informe Balance hídrico de la hoya del río Maipo CONIC-BF (2013) disponible en el SEIA. Éste realiza un balance hídrico de la parte alta de la cuenca del Río Maipo y de sus principales afluentes.

La información hidrológica utilizada en esta memoria corresponde a las estadísticas de caudales medios mensuales entre los años 1978-2005 en los puntos de control pertenecientes a la subcuenca de Alto Maipo que se sitúan en cauces o fuentes de agua superficial afluentes a la sección del río Maipo en estudio y aquellos situados en este último (ver Figura 13) obtenidos de CEA (2008) y CONIC-BF (2013).

- Estero Colina
- Estero La Engorda
- Quebrada Las Placas
- Cajón del Morado
- Volcán en Queltehues Maipo en Las Melosas
- Afluente a Embalse el Yeso
- Operación Embalse el Yeso
- Hoya intermedia río Maipo en San Alfonso: San Alfonso - (Volcán en Queltehues + Caudal Maipo en las Melosas + Yeso en descarga Embalse).
- Maipo en captación AES Gener (Régimen Natural).
- San Alfonso (Régimen Natural): Hoya Intermedia + Maipo en las Melosas + Volcán en Queltehues+ Afluentes a Embalse El Yeso.



Leyenda

- | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| ◆ QUEBRADA LAS PLACAS | ◇ CAJÓN DEL MORADO | ◆ RIO VOLCAN EN QUELTEHUES |
| ◆ OPERACIÓN EMBALSE EL YESO | ◆ ESTERO COLINA | ○ San Alfonso |
| ◆ AFLUENTE EMBALSE EL YESO | ◆ MAIPO EN CAPTACIÓN AES GENER | ○ El Toyo |
| ◆ ESTERO LA ENGORDA | ◆ RÍO MAIPO EN LAS MELOSAS | |

Figura 13: Ubicación Datos fluviométricos

4.1.6 Caudal ecológico cauces

Los caudales ecológicos que deben ser respetados en los puntos de captación del PHAM son los siguientes.

Tabla 9: Caudales ecológicos en captaciones PHAM. Fuente: CEA (2008)

Cauce	Caudal Ecológico [m3/s]
Cajón del Morado	0.17
Estero Las Placas	0.1
Estero Colina	0.37
Estero La Engorda	0.15
Río Yeso	0.2

4.2 Recopilación información sobre generación energía eléctrica PHAM y precio horario de venta energía en SIC

Con la finalidad de obtener una estimación del beneficio económico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM) se utilizó la información disponible en el SEIA y en el Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC). La información recopilada en la primera fuente consiste en la descripción de la operación de las centrales de pasada del proyecto. Los ingresos atribuibles a la generación de energía eléctrica del PHAM se estiman a partir de los precios del CDEC. Luego es necesario recopilar de la segunda fuente la información disponible de los costos marginales de la energía en el SIC a nivel horario durante año 2015 (último año con información completa de todos los meses).

1) Operación de las centrales de pasada del PHAM:

Si bien el PHAM comprende dos centrales de pasada, Alfalfal II y Las Lajas, para fines de esta memoria sólo se evaluará el beneficio generado por la primera central, ya que ésta recibe únicamente las aguas captadas en Cajón del Morado, Estero Colina, Estero La Engorda, Quebrada Las Placas y Descarga Embalse el yeso, captaciones que alteran el caudal en tramo de estudio del río Maipo por pertenecer a fuentes de agua afluentes a éste. La central Las Lajas recibe las aguas provenientes de Alfalfal (central que actualmente se encuentra en operación), Alfalfal II y de captaciones en río Colorado. La central Alfalfal II genera electricidad a partir de dos turbinas Pelton cada una con las siguientes características (AES Gener 2008):

- Potencia instalada [MW]: 136
- Caudal de diseño [m³/s]: 13.5
- Altura de caída de agua [m]: 1146
- Caudal mínimo para generar: 10% del Caudal de diseño.

2) Costo marginal energía en SIC

Se recopila información de los costos marginales de la energía en barra A. Jahuel a nivel horario para los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre del año 2015, ya que durante estos meses los usos extractivos y usos recreativos entran en conflicto, debido a que este último uso se aprovecha en temporada de verano (octubre-abril). La información de la frecuencia horaria de costos marginales para cada mes se presenta en los gráficos en Anexo B. La Figura 14 muestra los costos marginales promedios para cada mes, para observar como varía el precio de la energía a nivel mensual. Se observa que los meses de octubre a diciembre el precio de la energía presenta una baja considerable respecto al resto de los meses.

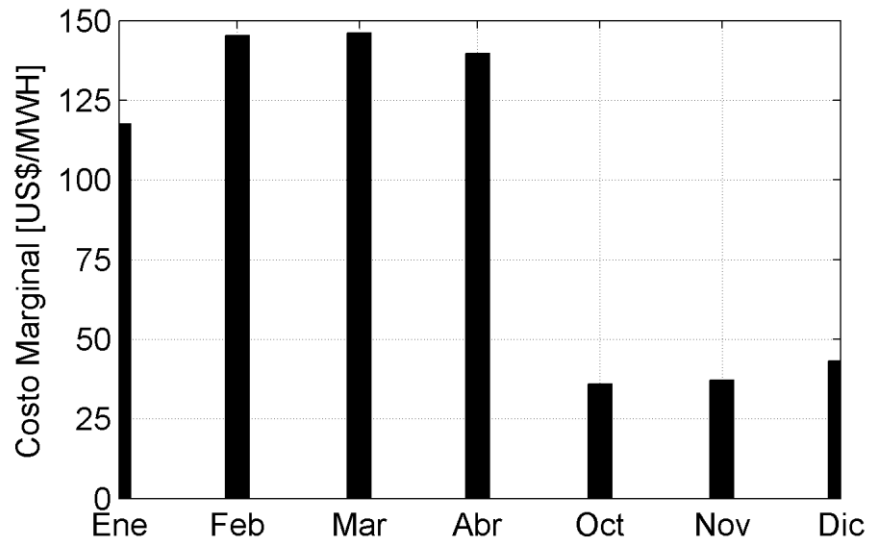


Figura 14: Promedios mensuales de los costos marginales de la energía durante año 2015

4.3 Beneficio actividades recreativas en función del caudal

A continuación se detalla el procedimiento realizado para obtener el beneficio de los usos in situ recreativos en función del caudal pasante en tramo del río Maipo.

Para cada uno de los 113 perfiles seleccionados para el tramo del río Maipo en estudio se realiza el siguiente procedimiento.

- 1) Obtención de curva de altura en función del caudal y velocidad en función del caudal pasante en cada perfil:

Ajustar mediante una función polinómica la velocidad en función del caudal y la altura en función del caudal a partir de los datos obtenidos de eje hidráulico de cada perfil.

La función polinomio entrega $n+1$ coeficientes de un polinomio de grado n que mejor ajusta los datos mediante método de mínimos cuadrados. Se obtiene las siguientes funciones:

$$H(Q) = p_{1_H} \cdot Q^n + p_{2_H} \cdot Q^{n-1} + \dots + p_{n_H} \cdot Q^1 + p_{(n+1)_H} \quad \text{Ec. 1}$$

$$V(Q) = p_{1_V} \cdot Q^n + p_{2_V} \cdot Q^{n-1} + \dots + p_{n_V} \cdot Q^1 + p_{(n+1)_V} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$H(Q)$: Altura del agua en perfil [m]

$V(Q)$: Velocidad del agua en perfil [$\frac{m}{s}$]

Q : Caudal pasante en perfil [$\frac{m^3}{s}$]

p_{i_H} : Coeficientes polinomio $H(Q)$ para $i=1\dots n+1$.

p_{i_V} : Coeficientes polinomio $V(Q)$ para $i=1\dots n+1$.

Un ejemplo de los polinomios ajustados para un perfil se observan en Figura 15.

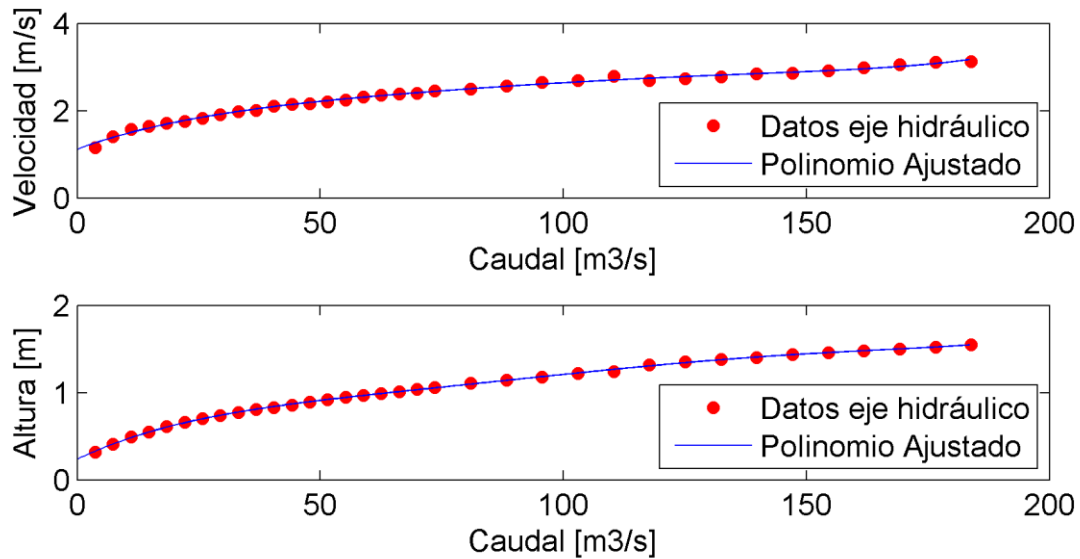


Figura 15: Ajuste Polinomio $V(Q)$ (gráfico superior) y $H(Q)$ (gráfico inferior) para un Perfil perteneciente a sección río Maipo en estudio

- 2) Obtención de función del beneficio cualitativo de las actividades recreativas en función de $H(Q)$ y $V(Q)$:

Aplicar beneficio (no económico) de rafting y kayak asociado a cada una de las alturas y velocidades evaluadas en cada perfil según funciones generadas en sección (3.1).

Beneficio cualitativo en función de altura:

$$\text{Si } H(Q) < 0.8 \Rightarrow B_H = \frac{2}{0.8} \cdot H(Q) + 1 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\text{Si } H(Q) \geq 0.8 \text{ y } H(Q) < 1.5 \Rightarrow B_H = \frac{2}{1.5 - 0.8} \cdot H(Q) + 0.7 \quad \text{Ec. 4}$$

$$\text{Si } H(Q) \geq 1.5 \text{ y } H(Q) \leq 1.75 \Rightarrow B_H = 5 \quad \text{Ec. 5}$$

$$\text{Si } H(Q) > 1.75 \text{ y } H(Q) < 2 \Rightarrow B_H = -8 \cdot H(Q) + 19 \quad \text{Ec. 6}$$

$$\text{Si } H(Q) \geq 2 \Rightarrow B_H = 3 \quad \text{Ec. 7}$$

Beneficio cualitativo en función de Velocidad:

$$Si V(Q) < 0.5 \Rightarrow B_V = \frac{2}{0.5} \cdot V + 1 \quad \text{Ec. 8}$$

$$Si V(Q) \geq 0.5 y V(Q) < 1 \Rightarrow B_V = 4 \cdot V(Q) + 1 \quad \text{Ec. 9}$$

$$Si V(Q) \geq 1 y V(Q) \leq 3 \Rightarrow B_V = 5 \quad \text{Ec. 10}$$

$$Si V(Q) > 3 y V(Q) \leq 6 \Rightarrow B_V = -1.33 \cdot V(Q) + 9 \quad \text{Ec. 11}$$

$$Si V(Q) > 6 \Rightarrow B_V = 1 \quad \text{Ec. 12}$$

$$Si V(Q) < 0.5 \Rightarrow B_V = \frac{2}{0.5} \cdot V + 1 \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

B_H : Beneficio cualitativo asociado a $H(Q)$.

B_V : Beneficio cualitativo asociado a $V(Q)$.

Q : Caudal pasante en sección río Maipo [$\frac{m^3}{s}$].

El procedimiento anterior se repite para la actividad de pesca en el río Yeso.

- 3) Obtener beneficio cualitativo actividades recreativas en río Maipo en función de rango de caudales a evaluar.

Generar curvas de beneficio cualitativo de rafting y kayak en función del caudal Q para cada perfil según beneficio establecido para la altura y para la velocidad. Se establece que el beneficio cualitativo en función del caudal corresponde al menor entre B_H y B_V .

La Figura 16 muestra el beneficio cualitativo de rafting y kayak para un perfil aleatorio perteneciente al tramo del río Maipo en estudio. Se observa que el resultado obtenido se asemeja a los resultados obtenidos por Shelby et al. (1992) (ver Figura 2) en cuanto a forma y valores.

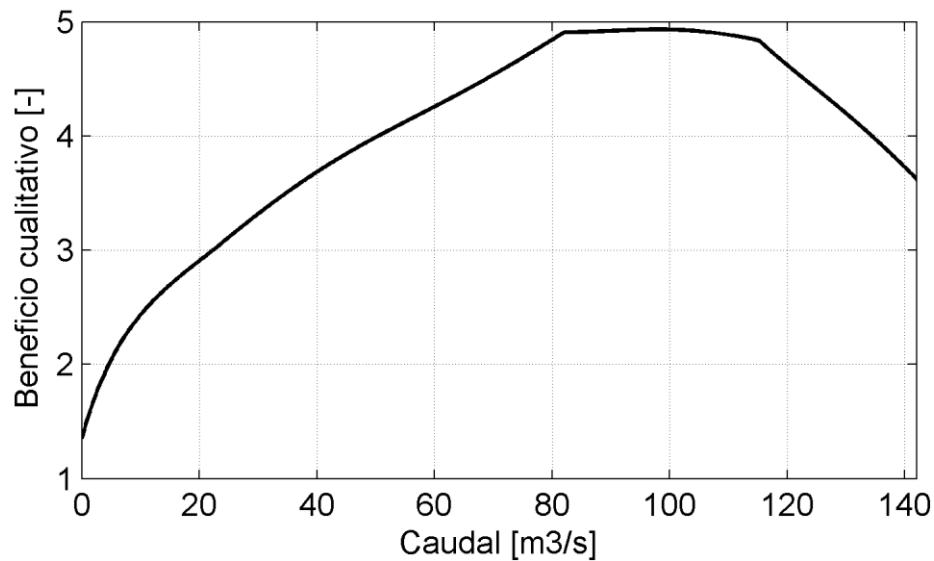


Figura 16: Beneficio kayak y rafting para un perfil en río Maipo

Los resultados obtenidos del beneficio no económico de las actividades recreativas de kayak y rafting en función del caudal para cada perfil son integrados por medio de indicadores para representar el beneficio cualitativo de estas actividades en función del caudal pasante en todo el tramo estudiado. Los indicadores utilizados corresponden a al beneficio promedio de todos los perfiles para cada caudal, el beneficio crítico (más desfavorable), los porcentajes de perfiles que presentan nivel por sobre aceptable y por sobre satisfactorio, y por último el indicador principal, el cual mide la cantidad de kilómetros continuos de río con nivel sobre aceptable, es decir, la cantidad máxima de kilómetros que garantizan la práctica de las actividades en función del caudal.

La cantidad de kilómetros continuos con nivel calidad sobre aceptable se obtiene de la Ecuación 14. Se realiza supuesto que entre dos perfiles consecutivos con nivel sobre aceptable, el tramo que los une también presenta nivel sobre aceptable.

$$KSA = \frac{(PSA - 0.5) \cdot 300}{1000} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

KSA: Kilómetros continuos de río con nivel de calidad sobre aceptable [*km*].

PSA: Cantidad máxima de perfiles continuos con nivel por sobre o igual a 3 (aceptable) [-].

Los resultados correspondientes al beneficio cualitativo de cada perfil perteneciente a tramo de río Maipo en donde se realizan actividades de kayak y rafting se representaran a partir del beneficio crítico (perfil más desfavorable) y beneficio promedio (ver Figura 17).

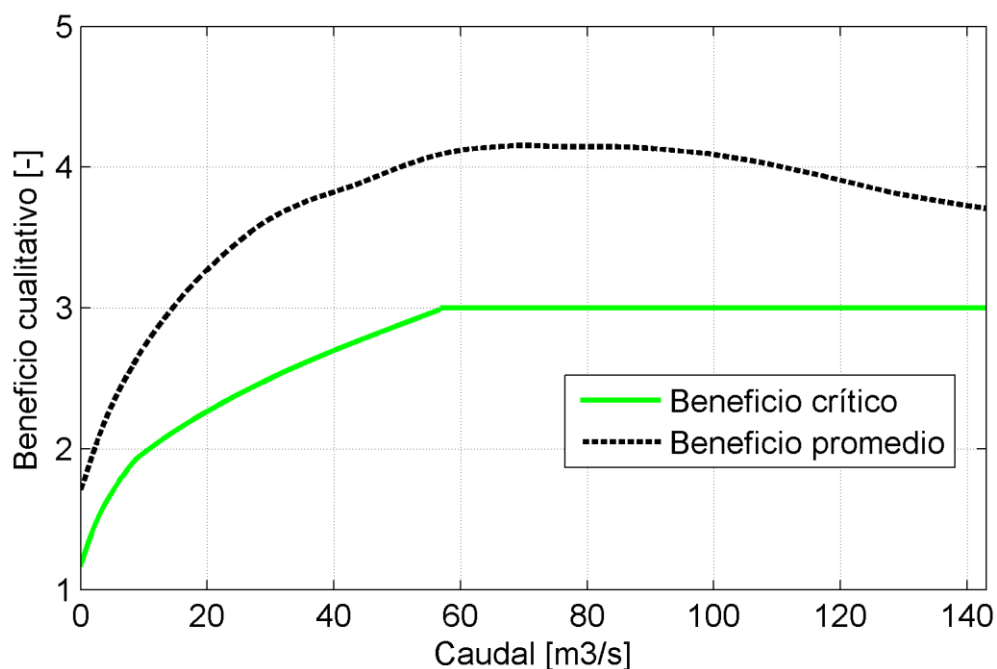


Figura 17: Beneficio cualitativo crítico y promedio, para las actividades de kayak y rafting en río Maipo.

Los resultados de Figura 17 muestran que para un caudal menor a $56.8 \text{ m}^3/\text{s}$ existen perfiles que presentan un beneficio cualitativo menor a tres, es decir, las actividades de kayak y rafting resultan insatisfactorias. Además por sobre este caudal todos los perfiles presentan un beneficio sobre aceptable. En consecuencia, un caudal de $56.8 \text{ m}^3/\text{s}$ resulta ser el mínimo para garantizar que las actividades recreativas se puedan desarrollar durante todo el trayecto y se nombra Caudal mínimo deseable. Por otro lado, se observa que el beneficio cualitativo promedio presenta una forma aproximadamente cóncava, aumenta hasta llegar a un rango en el que se mantiene relativamente constante y luego comienza a disminuir.

Adicionalmente se incorpora el porcentaje de perfiles con nivel de calidad sobre aceptable y con nivel sobre satisfactorio para cada caudal (ver Figura 18) con la finalidad de poder encontrar un rango de caudales deseable u óptimo, siendo éste aquel en donde todos los perfiles presenten un nivel por sobre aceptable y se tenga el mayor porcentaje de perfiles con nivel sobre satisfactorio.

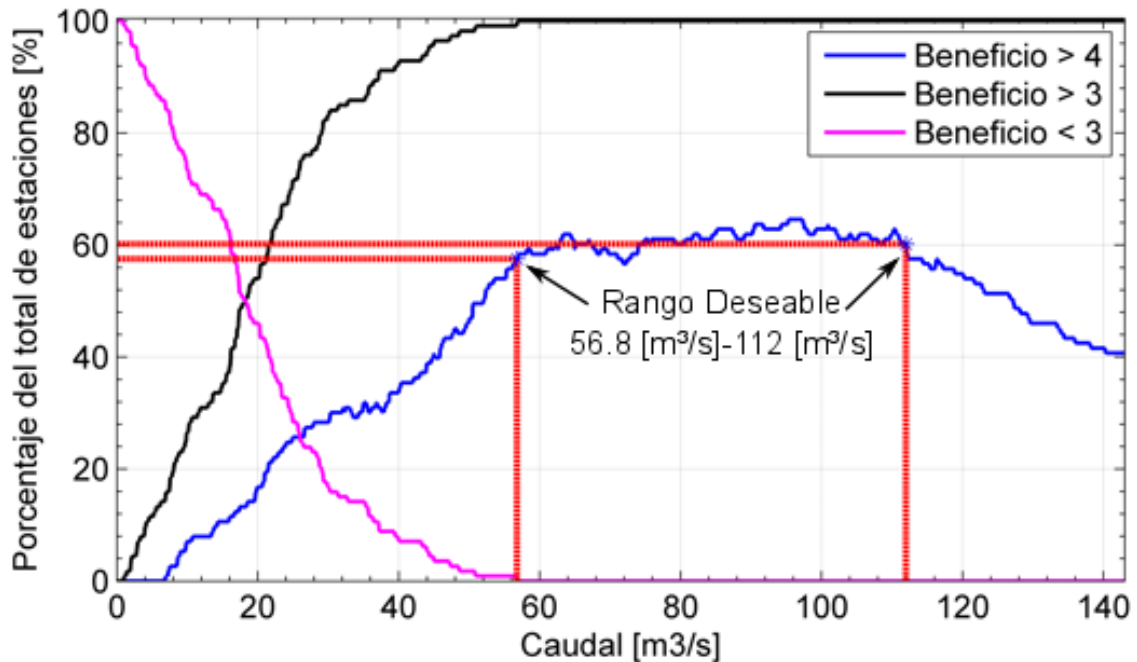


Figura 18: Porcentaje de perfiles con nivel de calidad por sobre satisfactorio (Beneficio > 4), por sobre aceptable (Beneficio > 3) e inferior a aceptable (Beneficio < 3).

En la Tabla 10 se presenta el valor de caudal en el cual el 60 % de los perfiles presenta un nivel de calidad por sobre aceptable (Q(60%)), caudal en el cual el 70 % de los perfiles presenta un nivel de calidad por sobre aceptable (Q(70%)), caudal en el cual el 80 % de los perfiles presenta un nivel de calidad por sobre aceptable (Q(80%)), caudal en el cual el 90 % de los perfiles presenta un nivel de calidad por sobre aceptable (Q(90%)) y caudal en el cual el 100 % de los perfiles presenta un nivel de calidad por sobre aceptable (Q(100%)). Este último corresponde al mínimo para garantizar que las actividades recreativas se puedan desarrollar durante todo el trayecto.

Tabla 10: Caudal para el cual se tiene un 60%, 70%, 80%, 90% y 100% de perfiles con nivel de calidad sobre aceptable

Q (60%)	Q (70%)	Q (80%)	Q (90%)	Q (100%)
21.6 m ³ /s	24.9 m ³ /s	29.1 m ³ /s	37.2 m ³ /s	56.8 m ³ /s

De la Figura 18 se observa que el porcentaje de perfiles que presentan un beneficio por sobre aceptable aumenta casi linealmente a medida que se tiene un mayor caudal hasta llegar a un caudal de 56.8 m³/s en donde el 100% de los perfiles presentan esta condición, manteniéndose este porcentaje para todos los caudales superiores. El porcentaje de perfiles que presentan un beneficio por sobre satisfactorio aumenta hasta llegar a un caudal de 56.8 m³/s y se mantiene fluctuando alrededor de un porcentaje del 60% hasta que comienza a descender cuando se tiene un caudal superior a 112 m³/s.

En consecuencia el rango de caudales entre $56.8 [m^3/s]$ y $112 [m^3/s]$ corresponde al rango deseable para practicar actividades de kayak y rafting en río Maipo.

Finalmente se incorpora la cantidad máxima de kilómetros continuos de río donde se puede practicar rafting y kayak con un beneficio por sobre aceptable (ver Figura 19). El presente indicador se considera relevante debido a que las actividades en estudio requieren que el cauce presente condiciones aptas para su práctica en todo su recorrido. Además el tiempo de duración de estas actividades depende directamente de la cantidad de kilómetros continuos en la que se puede realizar.

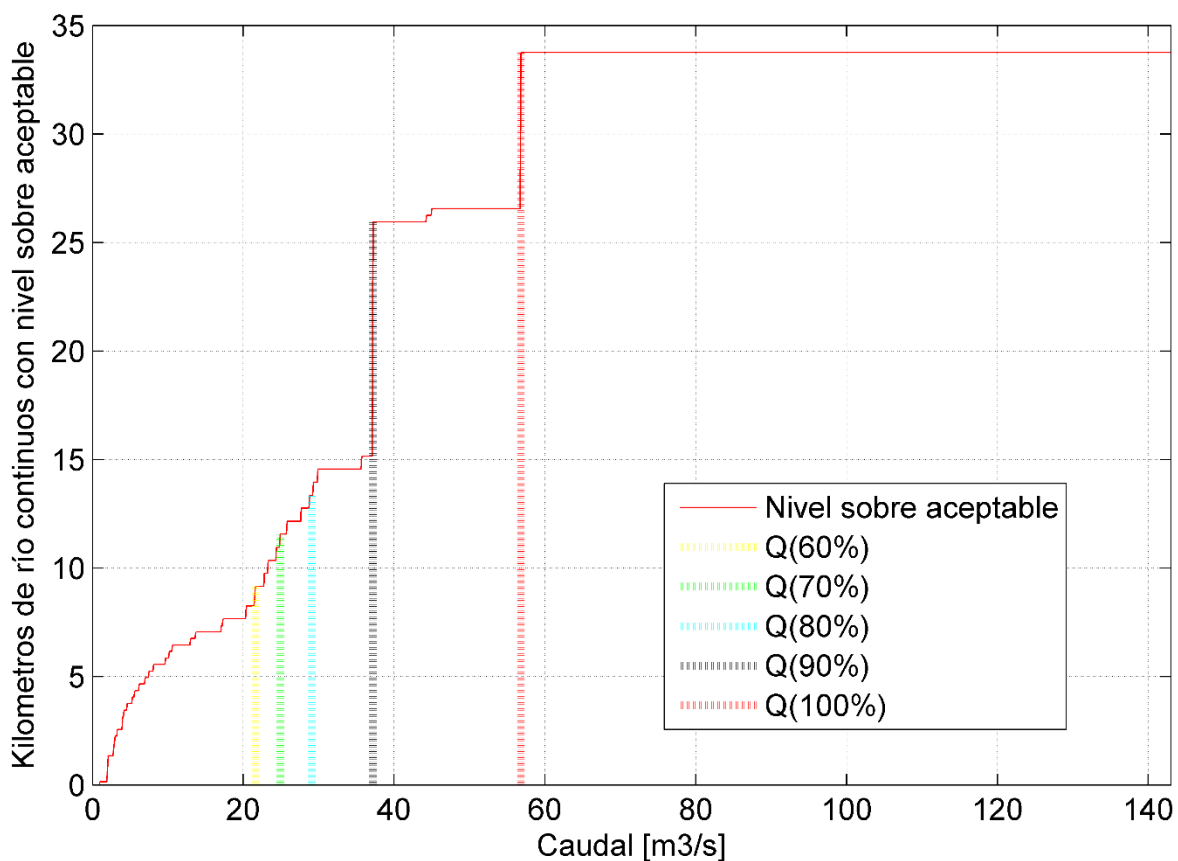


Figura 19: Máxima cantidad de kilómetros de río continuos con nivel de calidad sobre aceptable para actividad de rafting y kayak en río Maipo.

Los resultados obtenidos de la Figura 19 muestran que para un caudal menor a $37.2 [m^3/s]$ (Q(90%)) la cantidad de kilómetros de río continuo para practicar rafting y kayak disminuye fuertemente pasando aproximadamente de 25 km a 15 km. Luego en caso de que las condiciones no permitan mantener el río en rango deseable, se deberá evitar que sea menor a $37.2 [m^3/s]$.

Tabla 11: kilómetros de río continuos con nivel de calidad sobre aceptable para ciertos valores de caudal

Q (60%)	Q (70%)	Q (80%)	Q (90%)	Q (100%)
9.15 km	11.55 km	13.35 km	25.95 km	33.75 km

La Figura 20 presenta los resultados correspondientes al beneficio cualitativo de la pesca en cada perfil perteneciente a tramo de río Yeso. Esto se representa a partir del beneficio promedio. Se observa que el caudal ecológico de 0,2 [m^3/s] determinado en la descarga del embalse el Yeso no permite desarrollar la actividad de pesca en el tramo evaluado del río Yeso, debido a que para este caudal se presenta un nivel de calidad bajo dos.

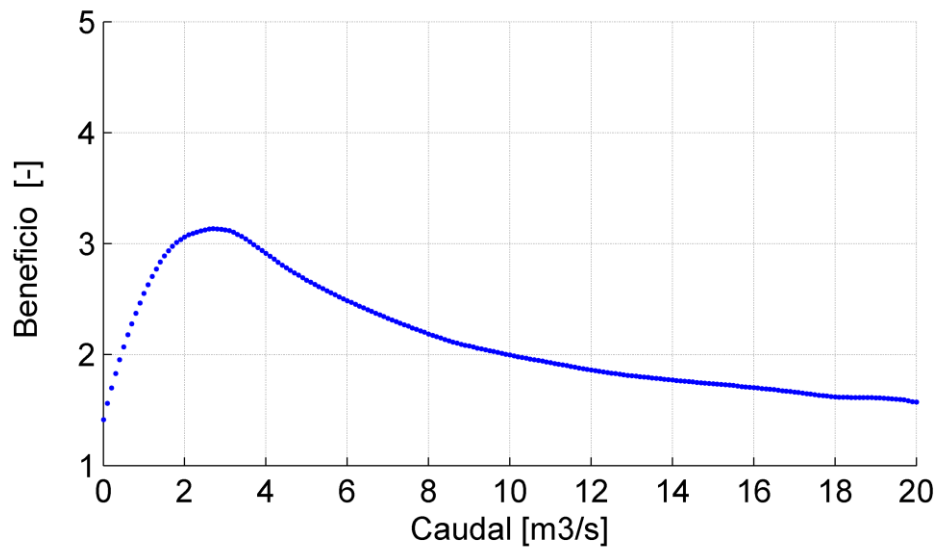


Figura 20: Beneficio cualitativo promedio para la pesca en río Yeso.

4.4 Beneficio económico usos extractivos

Para obtener el beneficio económico y marginal de los usos extractivos asociado al Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), es necesario previamente realizar los cálculos referentes a la cantidad de energía generada dado un cierto caudal extraído y el precio de venta de esa energía en el SIC.

1) Eficiencia turbinas

La eficiencia de las turbinas Pelton de la central Alfafal II se obtiene del ajuste mediante función polinomio de grado 2 de los datos correspondientes a curva de eficiencia de turbina Pelton conocida. La función de la curva de eficiencia es representada en un gráfico el cual tiene como eje horizontal el porcentaje de caudal que se genera respecto al caudal de diseño y en el eje vertical la eficiencia correspondiente (ver Figura 21).

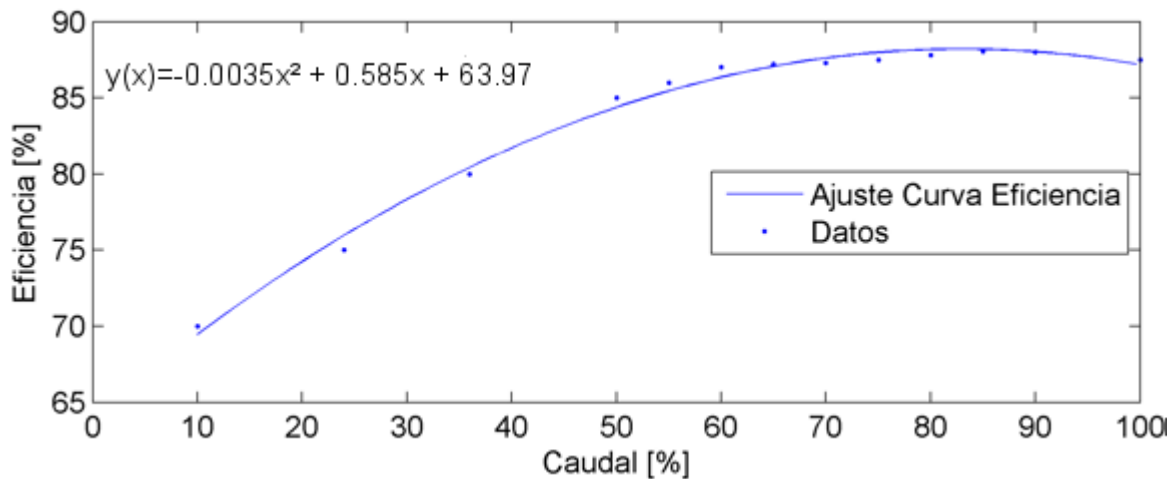


Figura 21: Curva eficiencia turbina Pelton

La función de eficiencia se obtiene con la Ec.15.

$$Ef(Q) = -0.0035 \cdot \left(\frac{Q}{Q_d} \cdot 100\right)^2 + 0.585 \cdot \left(\frac{Q}{Q_d} \cdot 100\right) + 63.97 \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

$Ef(Q)$: Eficiencia turbina Pelton [%].

Q : Caudal generado $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

Q_d : Caudal de diseño turbina $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

2) Precio energía en función del caudal medio mensual extraído:

Olivares (2012) propone un método para incorporar la variabilidad horaria del precio de la energía en la función del beneficio económico de centrales hidroeléctricas bajo el supuesto de que se conoce la distribución horaria del precio de la energía y que se opera de manera tal que los beneficios sean maximizados. Es decir, operando en las horas del mes donde el precio de energía es más alto.

La decisión sobre en qué horas operar se rige por curva de duración de precios que muestra el porcentaje del tiempo en horas (frecuencia f) en un mes en que el precio de energía excede ciertos niveles $P(f)$. El beneficio generado se obtiene del producto entre la energía generada y el precio de venta, éste último se obtiene como el promedio de todos los precios que exceden el nivel de precio asociado a frecuencia f . La frecuencia representa la proporción de horas en operación en un mes y se obtiene del cociente entre la generación en el mes y la generación máxima en un mes (turbinas operando a máxima capacidad durante todas las horas del mes).

El método supone que las turbinas siempre generan con el caudal de diseño, es decir, generaran a máxima capacidad durante una cantidad de horas igual al producto entre la frecuencia f y el total de horas en el mes. En consecuencia, las turbinas siempre funcionan con la misma eficiencia, luego la generación depende únicamente del caudal medio mensual turbinado. Por ende, la frecuencia se obtiene del cociente entre el caudal medio mensual turbinado y la capacidad máxima de caudal de la central.

El beneficio total se obtiene de:

$$B = E \cdot \bar{P}(f) \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

B : Beneficio económico [US\$].

E : Energía generada [MWH].

$\bar{P}(f)$: Promedio de todos los precios que exceden $P(f)$ $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{MWH}} \right]$.

$P(f)$: Promedio correspondiente a frecuencia f de la curva de duración de precios $\left[\frac{\text{US\$}}{\text{MWH}} \right]$.

f : Frecuencia [%].

a) Curva duración de precio energía mensual:

De la información disponible sobre costos marginales (precio de venta energía mensual) a nivel horario (ver Anexo B) se obtiene curva de probabilidad de excedencia acumulada del precio de venta la energía para cada mes, que llamaremos curva de duración de precios. Para esto se ordenan los precios de mayor a menor y se identifica para cada uno el número de horas del mes que presentan un valor mayor o igual, es decir, la frecuencia.

b) Precio energía mensual:

El precio de venta de la energía para cada mes se obtendrá a partir del método propuesto por Olivares (2012).

De la curva de duración de precios obtenida, para cada probabilidad de excedencia (f) se obtiene el precio promedio (\bar{P}), es decir, el promedio de todos los precios que exceden $P(f)$. Una vez obtenido $\bar{P}(f)$ se ajusta curva con función polinomio de grado n para obtener la ecuación de la curva.

Finalmente el precio de la energía en cada mes en función del caudal medio mensual extraído se obtiene de la siguiente ecuación:

$$PE_m(Q_m) = c1_m \cdot f(Q_m)^n + c2_m \cdot f(Q_m)^{n-1} + \dots + cn_m \cdot f(Q_m) + c(n+1)_m \quad \text{Ec. 17}$$

$$f(Q_m) = \frac{Q_m}{Q_{cap}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

$PE_m(Q_m)$: Precio de venta energía por PHAM en mes m [US\$].

cx_m : Coeficientes polinomio en mes m , x toma valores de 1 a $n+1$.

$f(Q_m)$: Frecuencia [%]

Q_m : Caudal medio extraído en mes m por PHAM [$\frac{m^3}{s}$].

Q_{cap} : Capacidad máxima central Alfalfal II, 27 [$\frac{m^3}{s}$].

Los resultados del modelo para generar la curva de duración de precios a partir de la información de costos marginales horarios de la energía y curva de precio de la energía para los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre se encuentran en el Anexo C.

3) Beneficio económico energía:

El beneficio económico de la central Alfalfal II se obtiene del producto entre la energía total generada en el mes y el precio de la energía en ese mes (PE_m).

La energía generada en cada mes depende de la potencia instalada, es decir, de la máxima potencia que puede desarrollar la central cuando sus turbinas funcionan a capacidad, se obtiene de la siguiente manera:

$$P_{inst} = \sum_{i=1}^2 \frac{h \cdot Q_d \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{Ef_{turbina_i}(Q_d)}{100}}{1000} \quad \text{Ec. 19}$$

$$Ef_{turbina_1}(Q_d) = Ef_{turbina_1}(Q_d) = \left(-0.0035 \cdot \left(\frac{Q_{cap}}{2} \cdot \frac{100}{Q_d} \right)^2 + 0.585 \cdot \left(\frac{Q_{cap}}{2} \cdot \frac{100}{Q_d} \right)^1 + 63.97 \right) \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

P_{inst} : Potencia instalada [MW].

h : Altura caída de agua [m].

Q_d : Caudal de diseño turbina, 13.5 [m^3/s].

ρ : Densidad del agua [$\frac{gr}{cm^3}$].

g : Aceleración de gravedad [$\frac{m}{s^2}$].

$Ef_{turbina_i}$: Eficiencia turbina, $i = 1, 2$.

La energía generada se obtiene del producto entre la potencia instalada y la cantidad de horas efectivas de generación.

$$E_m(Q_m) = P_{inst} \cdot \frac{f(Q_m)}{100} \cdot hrs \cdot dias_m \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

$E_m(Q_m)$: Energía generada en mes m [MWH].

hrs : Horas del día, 24 [-].

$dias_m$: Días en mes m [-].

Finalmente se obtiene el beneficio económico mensual generado por la central Alfalfal II del PHAM:

$$B_m(Q_m) = E_m(Q_m) \cdot PE_m(Q_m) \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

$B_m(Q_m)$: Beneficio económico en mes m [US\$].

4) Beneficio marginal energía respecto al caudal extraído:

En principio se requiere obtener la pérdida de beneficio económico por mantener una unidad más de caudal en el cauce. Para esto se obtiene el beneficio económico asociado a extraer una unidad más de caudal, es decir, el beneficio marginal de la central Alfalfal II, el cual resulta de la derivada del beneficio respecto al caudal captado.

$$Bmg_m = \frac{\partial B_m}{\partial Q_m} = \frac{\partial E_m}{\partial Q_m} \cdot PE_m + \frac{\partial PE_m}{\partial Q_m} \cdot E_m \quad \text{Ec. 23}$$

$$Bmg_m = P_{inst} \cdot \frac{hrs \cdot dias_m}{Q_{cap}} \cdot PE_m + \frac{100}{Q_{cap}^n} \cdot (Q_{cap}^{n-1} \cdot c_n + 2 \cdot 100^1 \cdot Q_{cap}^{n-2} \cdot c_{n-1} + 3 \cdot 100^2 \cdot Q_{cap}^{n-3} \cdot c_{n-2} \dots + n \cdot 100^{n-1} \cdot Q_{cap}^{n-n} \cdot c_1) \cdot E_m \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

Bmg_m : Beneficio marginal en mes m [$US\$/\frac{m^3}{s}$].

n : Grado de polinomio de la función de precio de venta energía por PHAM.

El beneficio económico y marginal en función del caudal medio mensual generado por la central Alfalfa II del PHAM para los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre se muestran en Anexo D.

4.5 Régimen natural, actual y con PHAM bajo limitaciones en las extracciones y su incidencia en los usos in situ recreativos

Se evalúa la situación del río Maipo en régimen natural (sin intervención antrópica), en situación actual (usos extractivos que se encuentran en operación) y situación futura (Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo operando).

Debido a que en la situación actual se realizan actividades recreativas de kayak y rafting, el conflicto principal se enmarca en la situación futura, con la incorporación del proyecto Alto Maipo. En particular, existe incertidumbre respecto a si el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM) perjudicará las actividades recreativas que se realizan en el sector y en qué medida. En esta sección se evalúa la incidencia del proyecto en las actividades recreativas bajo limitaciones en los derechos de aprovechamiento de agua otorgados al PHAM en los puntos de captación. Esto se realiza ponderando el derecho de aprovechamiento en cada punto de captación por un porcentaje α fijo el cual tomará valores entre cero y 100. En efecto, si α es 0% las captaciones son nulas, coincidente con situación la actual, sin proyecto. En el otro extremo, si α es 100%, el PHAM puede aprovechar sus derechos sin restricción.

A continuación se detalla el procedimiento seguido para evaluar la incidencia del PHAM en las actividades recreativas. Para esto se obtendrán los caudales medios mensuales en tramo del río Maipo en estudio. Por consiguiente es necesario 1) definir previamente que punto(s) del cauce se considera(n) representativo(s) en cuanto a caudales medios mensuales del tramo en estudio, luego 2) Calcular el régimen natural con el fin de evaluar que años se consideran secos y cuales normales, con la finalidad de evaluar el efecto de la extracciones del PHAM en la recreación en un año real seco y real normal. 3) Calcular el régimen en situación actual y por último 4) Simular la situación futura, es decir, con PHAM operando ante distintas limitaciones a los derechos de agua otorgados en los puntos de captación del proyecto.

1) Puntos de evaluación en sección río Maipo

Se definen los puntos de sección del río Maipo en donde se evalúan los caudales medios mensuales en régimen natural, situación actual y futura. Se tienen dos sectores con información fluviométrica, San Alfonso y El Toyo. Sin embargo, el aporte intermedio entre San Alfonso y El Toyo es despreciable en los meses donde se realizan actividades recreativas (oct-abril). En consecuencia los cálculos se realizarán únicamente en San Alfonso, suponiendo que el caudal pasante en este sector es representativo de toda la sección del río Maipo en estudio.

2) Cálculo régimen natural:

El régimen natural en San Alfonso se obtiene de los registros de caudales medios mensuales entre los años 1978-2004 aportantes al punto de medición.

$$SA_{RegimenNatural_{a,m}} = HI_{a,m} + M_{a,m} + V_{a,m} + A E Y_{a,m} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

$SA_{RegimenNatural_{a,m}}$: Caudal pasante en San Alfonso en régimen natural en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$HI_{a,m}$: Hoya intermedia río Maipo en San Alfonso en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$M_{a,m}$: Maipo en Las Melosas en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$V_{a,m}$: Volcán en Queltehues en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$A E Y_{a,m}$: Afluente a Embalse el Yeso en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

A partir del régimen natural se busca que años del registro son representativos de un año seco y de un año normal. Para esto se obtiene el caudal promedio anual de cada año y se calcula las probabilidades de excedencia de un 85% y un 50%, las cuales representan un año seco y normal respectivamente. Del registro de caudales medios anuales se verifica que año coincide con la probabilidad de excedencia de un 85% y un 50%. Estos corresponden a un año seco y un año normal.

- Año hidrológico seco: 1999-2000
- Año hidrológico normal: 1993-1994

La Figura 22 muestra la serie de caudales medios mensuales en río Maipo en San Alfonso para los años hidrológicos comprendidos entre 1978 y 2005 en régimen natural (sin intervención antrópica), en situación actual y simulación de situación futura (Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo operando (PHAM)). Se observa que en las tres situaciones la variabilidad estacional sigue el mismo patrón, aumentando fuertemente sus caudales en temporada de verano. Se observa que el año seco real (1990-2000) y el año normal real (1993-1994) obtenido con el régimen natural son también representativos para el caso de la situación actual y futura.

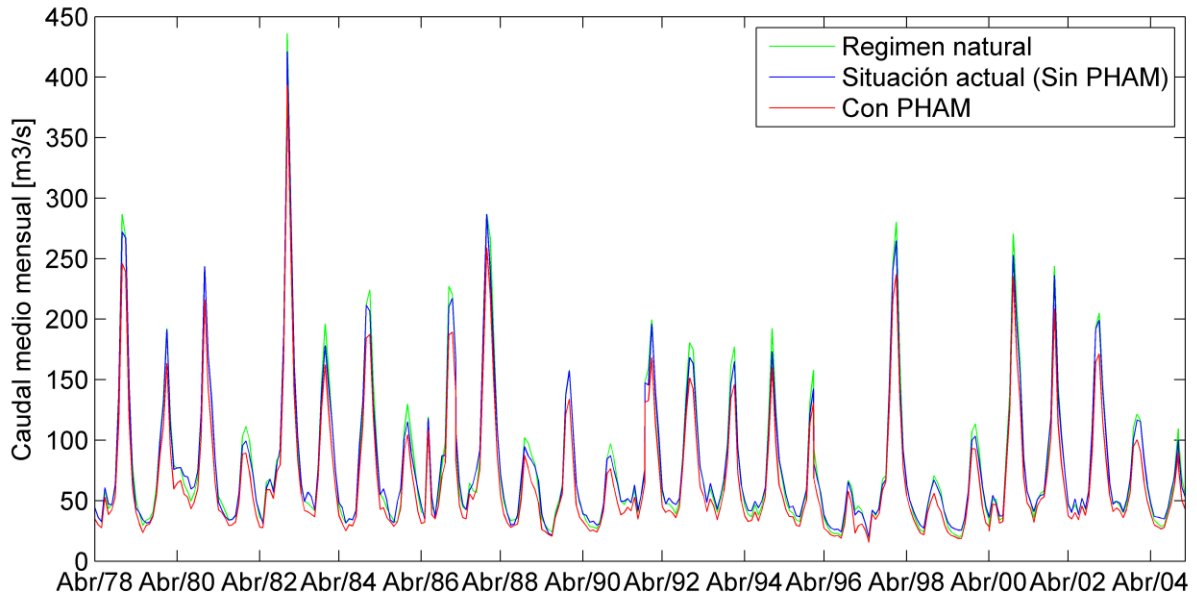


Figura 22: Serie de caudales medios mensuales río Maipo en San Alfonso.

3) Cálculo situación actual:

El régimen actual en San Alfonso se obtiene de los registros de caudales medios mensuales entre los años 1978-2004 aportantes al punto de medición.

$$SA_{Actual_{a,m}} = HI_{a,m} + M_{a,m} + V_{a,m} + OEY_{a,m} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

$SA_{Actual_{a,m}}$: Caudal pasante en San Alfonso en situación actual en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$HI_{a,m}$: Hoya intermedia río Maipo en San Alfonso en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$M_{a,m}$: Maipo en Las Melosas en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$V_{a,m}$: Volcán en Queltehueles en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$OEY_{a,m}$: Operación Embalse el Yeso en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

4) Cálculo situación futura (PHAM operando):

El régimen futuro en San Alfonso se obtiene de los registros de caudales medios mensuales entre los años 1978-2004 aportantes al punto de medición menos las extracciones en los puntos de captación del PHAM.

$$SA_{PHAM_{a,m}} = HI_{a,m} + M_{a,m} + V_{a,m} + OEY_{a,m} - E_{Morado_{a,m}} - E_{Colina_{a,m}} - E_{Engorda_{a,m}} - E_{Placas_{a,m}} - E_{Yeso_{a,m}} \quad \text{Ec. 27}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$Si Q_{i_{a,m}} \geq \alpha_x \cdot D_{i_m} + Q_{eco_i} \rightarrow E_{i_{a,m}} = \alpha_x \cdot D_{i_m} \quad \text{Ec. 28}$$

$$Si Q_{i_{a,m}} < \alpha_x \cdot D_{i_m} + Q_{eco_i} \text{ y } Q_{i_{a,m}} \geq Q_{eco_i} \rightarrow E_{i_{a,m}} = Q_{i_{a,m}} - Q_{eco_i} \quad \text{Ec. 29}$$

$$Si Q_{i_{a,m}} < Q_{eco_i} \rightarrow E_{i_{a,m}} = 0 \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

$SA_{PHAM_{a,m}}$: Caudal pasante en San Alfonso en situación futura en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$HI_{a,m}$: Hoya intermedia río Maipo en San Alfonso en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$M_{a,m}$: Maipo en Las Melosas en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$V_{a,m}$: Volcán en Queltehues en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$OEY_{a,m}$: Operación Embalse el Yeso en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$E_{Morado_{a,m}}$: Extracción de caudal en Cajón del Morado en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$E_{Colina_{a,m}}$: Extracción de caudal en Estero Colina en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$E_{Engorda_{a,m}}$: Extracción de caudal en Estero La Engorda en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$E_{Placas_{a,m}}$: Extracción de caudal en Quebrada Las Placas en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$E_{Yeso_{a,m}}$: Extracción de caudal en descarga Embalse el Yeso en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$Q_{i,a,m}$: Caudal pasante en punto de captación i en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

$D_{i,m}$: Derecho de aprovechamiento de agua otorgado en punto de captación i y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

Q_{eco_i} : Caudal ecológico en punto de captación i $[\frac{m^3}{s}]$.

$E_{i,a,m}$: Extracción de caudal en punto de captación i en año a y mes m $[\frac{m^3}{s}]$.

α_x : Porcentaje x [%]. x= 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100.

Las captaciones i corresponden a los puntos situados en Cajón del Morado, Estero Colina, Estero La Engorda, Quebrada Las Placas y Descarga Embalse el yeso.

La Figura 23 muestra las curvas de variación estacional en río Maipo en San Alfonso para las probabilidades de excedencia de un 10%, 15% (mes húmedo), 50% (mes normal), 85% (mes seco) y 90% en situación actual y con PHAM. Además se señala el caudal mínimo deseable ($56.8 m^3/s$), el cual corresponde al mínimo para garantizar la práctica de las actividades en todo el tramo del río en estudio, con la finalidad de observar en qué medida el PHAM afectará las actividades de rafting y kayak.

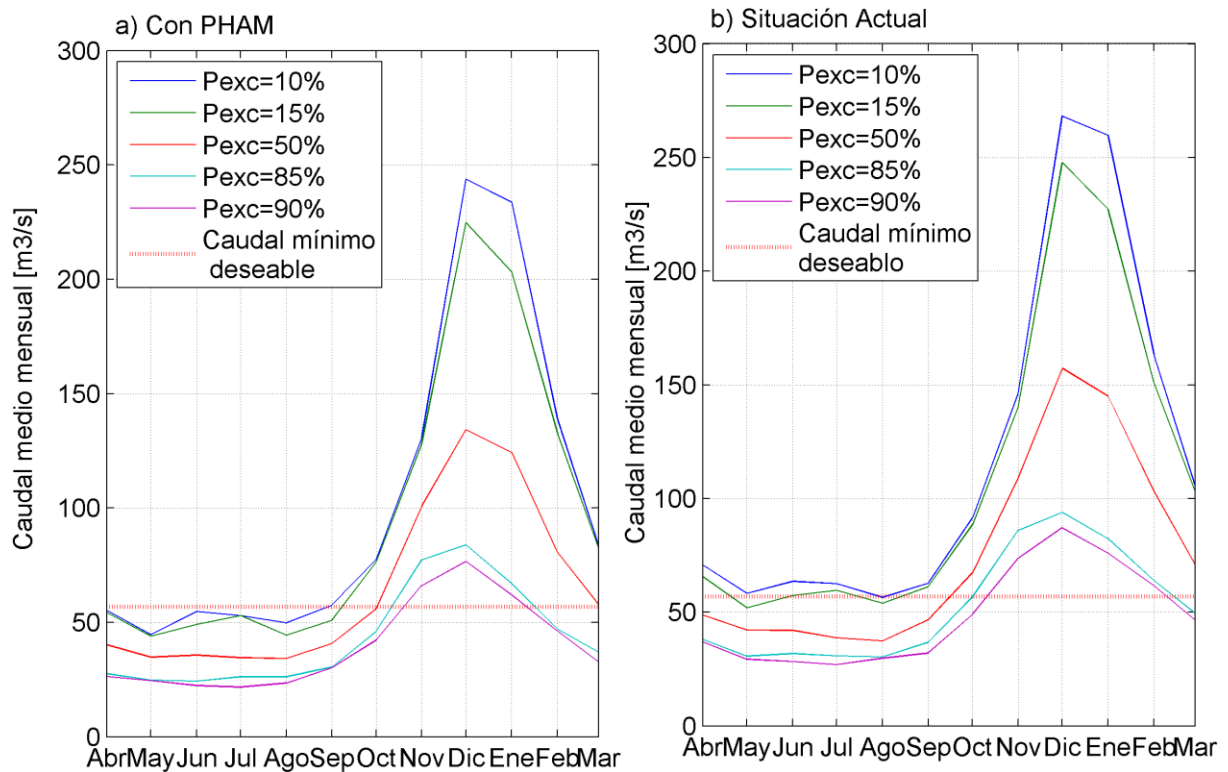


Figura 23: Curva de variación estacional río Maipo para situación a) con Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo operando, b) Actual.

Dado que las actividades de kayak y rafting se realizan en los meses de verano (octubre a abril) el análisis se enfocará únicamente en estos meses.

Los resultados de la Figura 23 muestran que el PHAM reducirá los caudales medios mensuales en río Maipo, afectando la calidad de las actividades recreativas en los meses de abril, octubre y febrero. Debido a que bajo ciertas probabilidades de excedencia el caudal deja de ser suficiente para garantizar un beneficio por sobre aceptable en todo el tramo del río. Esto se observa en abril para una probabilidad de excedencia menor a un 15%, ya que el caudal disminuye respecto a la situación actual dejándolo por debajo del caudal mínimo deseable, situación que no ocurre con la ausencia del PHAM. Lo mismo sucede para los meses de octubre y febrero para las probabilidades de excedencia de un 85% e inferiores e iguales a un 85% respectivamente. Además el PHAM también afecta negativamente durante los meses de abril, octubre y marzo, empeorando la calidad de la recreación en los escenarios en que la situación actual no es la deseable, debido a que mayores disminuciones en el caudal implican menos kilómetros de río continuos que garantizan la práctica de las actividades (ver Figura 19). Esto se observa en abril para probabilidades de excedencia menores a un 50%, en octubre para probabilidades de excedencia de un 90% y en marzo para probabilidades de excedencia menor o igual a un 85%.

Las Figuras 24 y 25 muestran resultados de los caudales medios mensuales en el río Maipo en San Alfonso simulados en un año hidrológico seco (1999-2000) y en un año hidrológico normal (1993-1994) respectivamente para la situación con PHAM sujeto a las limitaciones aplicadas a los derechos de aprovechamiento, permitiendo a la hidroeléctrica extraer un porcentaje α del 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de los derechos de aprovechamiento otorgados en cada punto de captación.

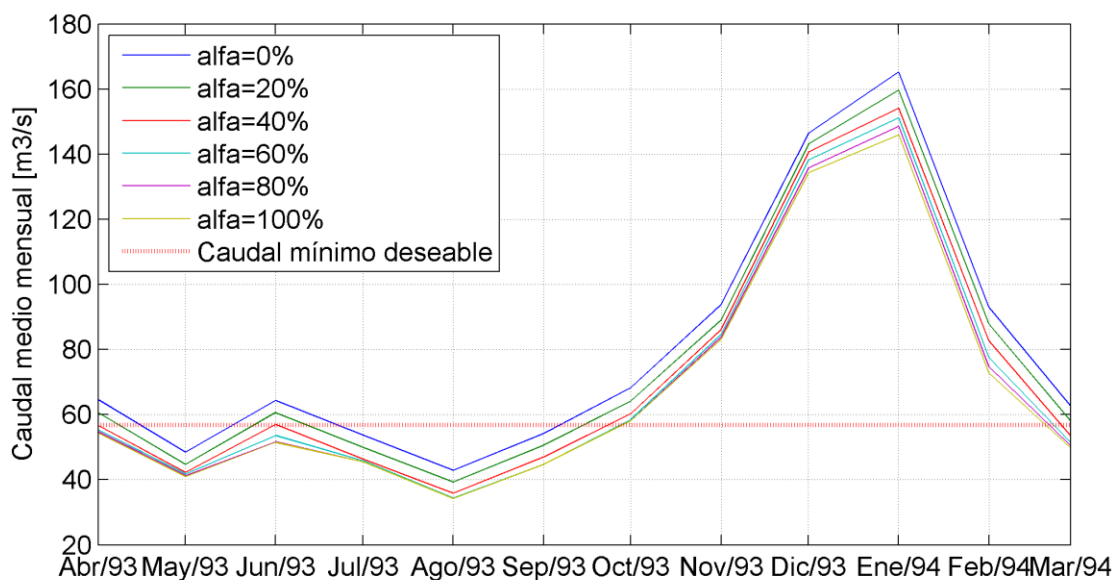


Figura 24: Caudales medios mensuales en un año hidrológico normal (1993-1994).

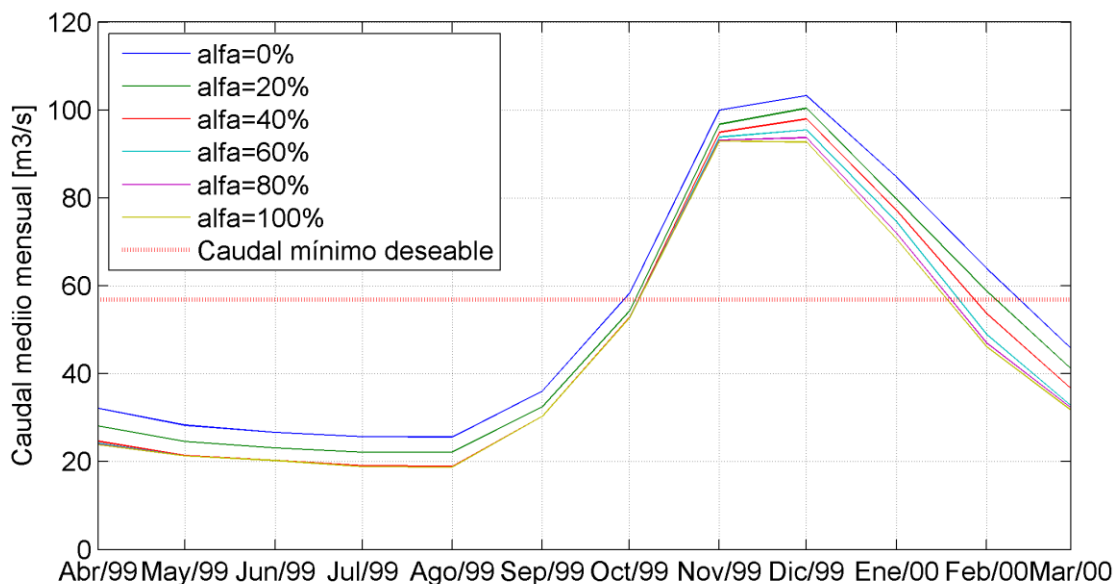


Figura 25: Caudales medios mensuales en un año hidrológico seco (1999-2000).

Para el año 1999-2000 (año seco) se observa que los meses que presentan caudales medios bajos (abril-octubre) es necesario limitar las extracciones en menos de un 40% de los derechos para observar una respuesta significativa en el río Maipo, es decir, un aumento en los caudales medios mensuales respecto a la situación sin restricción ($\alpha=0\%$), debido a que para α mayores al 40%, el caudal medio mensual no presenta variaciones significativas. Esto sucede producto que los caudales medios mensuales pasantes en los puntos de captación son inferiores a la suma entre caudal ecológico y derecho de aprovechamiento, luego por restricción del primero no pueden captar la totalidad del derecho. Para el caso de un año normal (1993-1994) el comportamiento es similar para los meses con caudales bajos con la diferencia que la limitación es significativa para extracciones menores al 60% de los derechos. Por otro lado, en ambos años se observan meses en donde las restricciones permiten aumentar el caudal en el río Maipo hasta ser mayores al caudal mínimo deseable.

En resumen las actividades recreativas se ven afectadas producto del PHAM en un año seco real (1999-2000) los meses de febrero, marzo, abril y octubre y en un año real normal (1993-2000) los meses de marzo y abril.

Finalmente se muestran resultados de las probabilidades de excedencia de caudales medios en febrero, marzo, abril y octubre en el río Maipo en San Alfonso para la situación con PHAM sujeto a las limitaciones aplicadas a los derechos de aprovechamiento, es decir, permitiendo a la hidroeléctrica extraer un porcentaje α del 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de los derechos de aprovechamiento otorgados en cada punto de captación (ver Figuras 26, 27, 28 y 29).

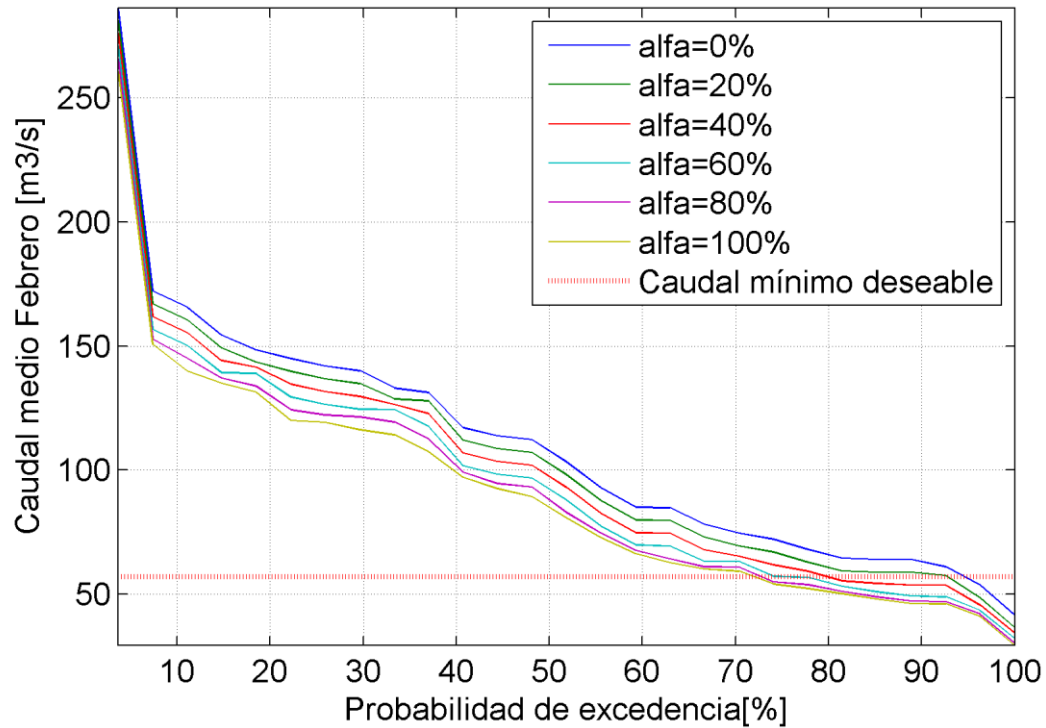


Figura 26: Probabilidad de excedencia de caudales medios en febrero.

De la Figura 26 se observa que en febrero aproximadamente el 25% del tiempo se tienen caudales menores al mínimo deseable producto de la puesta en operación del PHAM, a diferencia de la situación actual donde este porcentaje es de un 5%. Además los meses de febrero secos (representados por una probabilidad de excedencia 85%) se verán afectados por las captaciones del PHAM cuando se permite extraer más de un 30% de cada derecho de agua.

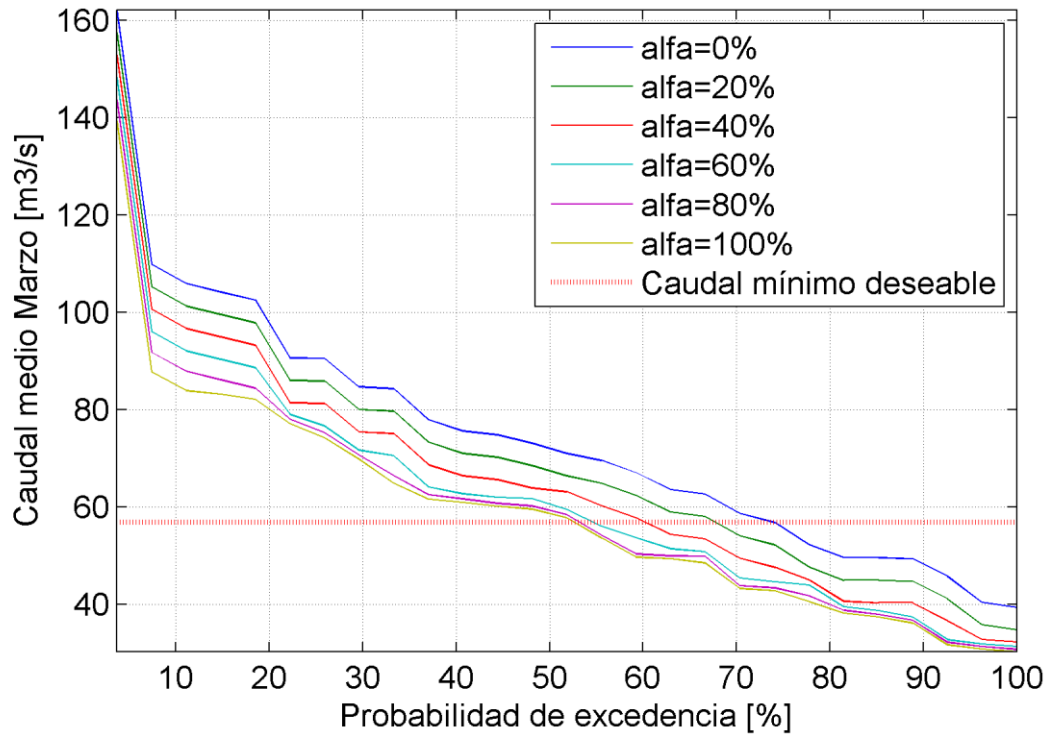


Figura 27: Probabilidad de excedencia de caudales medios en marzo.

De la Figura 27 se observa que en Marzo aproximadamente el 47% del tiempo se tienen caudales menores al mínimo deseable producto de la puesta en operación del PHAM, a diferencia de la situación actual donde este porcentaje es de un 25%. Además los meses de marzo secos el caudal en el río Maipo sin PHAM es insuficiente para practicar kayak y rafting en todo el tramo del río. Sin embargo, con la puesta en operación del PHAM la calidad de estas actividades disminuirá aún más en ciertos perfiles en escenarios secos, esto se observa en la Figura 18, donde se puede ver que la cantidad de perfiles con nivel de calidad sobre aceptable se reduce a medida que el caudal disminuye cuando se tienen caudales menores al mínimo deseable.

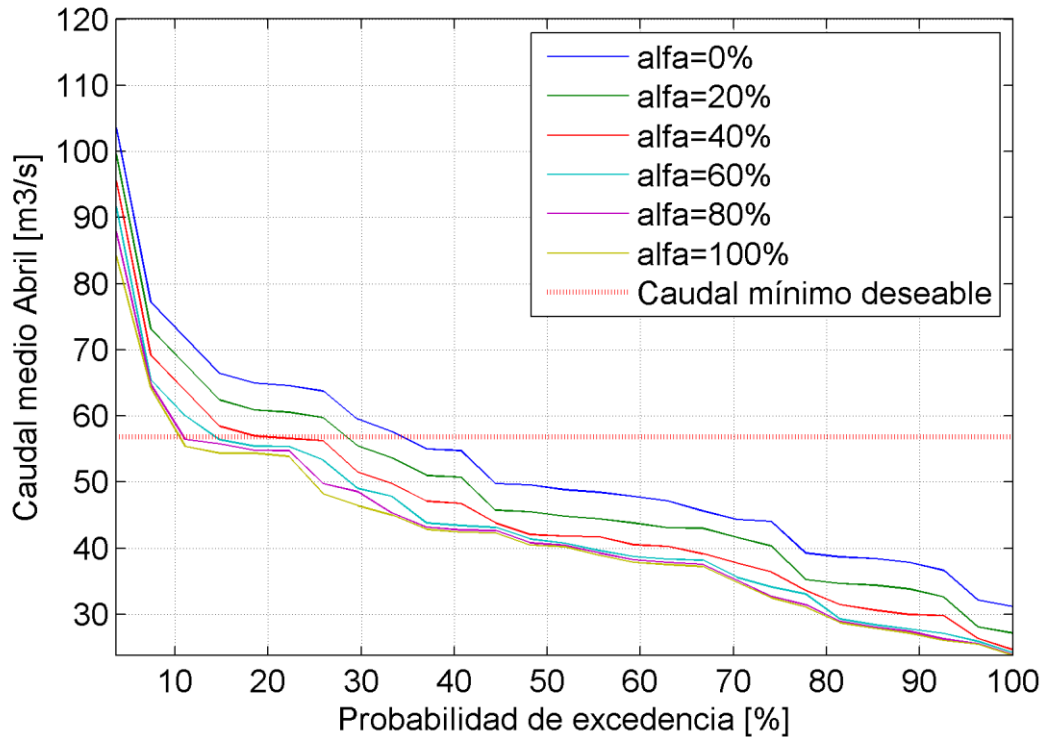


Figura 28: Probabilidad de excedencia de caudales medios en abril.

De la Figura 28 se observa que en abril aproximadamente el 90% del tiempo se tienen caudales menores al mínimo deseable producto de la puesta en operación del PHAM a diferencia de la situación actual donde este porcentaje es de un 65%. Además los meses de abril secos el caudal en río Maipo sin PHAM permite practicar kayak y rafting por aproximadamente 25 km. Sin embargo, con la puesta en operación del PHAM la cantidad de kilómetros de río aptos para practicar estas actividades será menor a 15 km. Los meses de abril normales (representados con probabilidad de excedencia 50%) también se ven afectados por el PHAM.

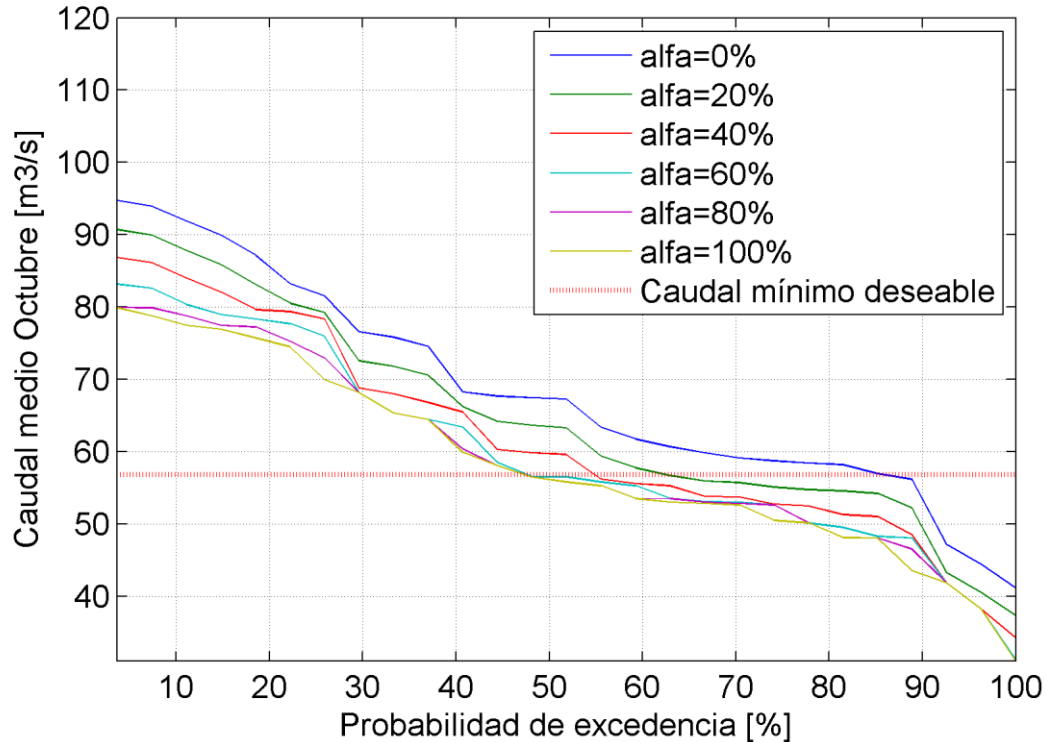


Figura 29: Probabilidad de excedencia acumulada de caudales medios en octubre.

De la Figura 29 se observa que en octubre aproximadamente el 50% del tiempo se tienen caudales menores al mínimo deseable producto de la puesta en operación del PHAM a diferencia de la situación actual donde este porcentaje es de un 12%. Además los meses de Octubre secos el caudal en río Maipo sin PHAM permite practicar kayak y rafting en todo el tramo del río Maipo. Sin embargo, con la puesta en operación del PHAM algunos perfiles del río disminuirán la calidad de la recreación, disminuyendo la cantidad de kilómetros de río aptos para la recreación a aprox. 25 km.

En resumen en estos cuatro meses el PHAM afectará la práctica de rafting y kayak en el río Maipo, disminuyendo la calidad de estos en algunas secciones del río o bien disminuyendo la cantidad de kilómetros continuos aptos para su práctica. Sin embargo, estos factores se ven menos afectados restringiendo las captaciones, permitiendo extraer un porcentaje α de cada derecho otorgado.

4.6 Análisis integrado de *tradeoffs*

La integración de los resultados de las curva de oferta del PHAM y el beneficio cualitativo de las actividades recreativas en río Maipo en función del caudal permiten determinar la(s) asignación(es) óptima(s) de caudal medio mensual entre los usos destinados a recreación y a hidroelectricidad. Esta asignación se considera eficiente cuando no es posible mejorar un uso sin perjudicar el otro, es decir, eficiente en el sentido de Pareto. Luego una asignación es mejor que otra cuando se puede disminuir el costo de oportunidad del PHAM sin perjudicar la calidad de las actividades recreativas.

El indicador principal para medir la calidad de las actividades de rafting y kayak corresponde a la cantidad de kilómetros continuos en el río Maipo en donde las actividades presentan un beneficio por sobre el aceptable, ya que este nivel corresponde al mínimo necesario para garantizar que las actividades se pueden practicar.

La asignación eficiente mensual se representa con el porcentaje α a aplicar a los derechos de aprovechamiento de agua ya otorgados. Luego el producto entre α óptimo y la suma de los derechos de agua otorgado representa la cantidad de agua a destinar al uso extractivo (hidroelectricidad).

Para los meses de verano (octubre a abril) se obtiene la asignación eficiente mensual en los escenarios presentados en la Tabla 12. Sin embargo, de los resultados de la sección 4.6 (Figuras 23, 24 y 25) se obtiene que para los meses de noviembre, diciembre y enero el PHAM no afecta las actividades recreativas bajo ningún porcentaje α de extracción evaluado en los cuatro escenarios. En consecuencia, se obtiene que para estos meses la asignación óptima al proyecto extractivo resulta ser un porcentaje α del 100%, es decir, el PHAM puede extraer el 100% de cada uno de sus derechos de agua otorgados.

Las figuras 30, 31, 33, 34, 36, 37, 39 Y 40 presentan la curva de oferta de los usos in situ (actividades de rafting y kayak) y la cantidad de kilómetros continuos con nivel de calidad por sobre aceptable (km de río) en función del caudal medio mensual que se mantiene en el río Maipo para los meses de febrero, marzo, abril y octubre en los cuatro escenarios mostrados en Tabla 12. El rango de caudal representado en los gráficos corresponde a la situación con PHAM permitiendo extraer un porcentaje α del 0% al 100% de cada derecho de agua (extremo derecho e izquierdo respectivamente). Donde α 0% coincide con situación actual y α 100% con situación con PHAM operando sin restricciones.

Se presentan tablas de resumen de resultados para ciertos escenarios, las cuales detallan para cada porcentaje α de extracción, el caudal en río Maipo en San Alfonso ($Q_{río}$), la cantidad de kilómetros continuos de río con nivel sobre aceptable (km de río), el costo de oportunidad del PHAM (Costo Op.), el porcentaje de perfiles con nivel de

calidad sobre aceptable (A), el porcentaje de perfiles con nivel de calidad sobre satisfactorio (S), el beneficio crítico (B_c) y el beneficio económico del PHAM (B_{PHAM}).

Además se presenta la relación entre caudal que se mantiene en el río Maipo en San Alfonso y el porcentaje α para los meses de febrero, marzo, abril y octubre en los cuatro escenarios.

Finalmente es posible determinar la(s) asignación(es) eficiente(s) para cada mes en cada escenario representado por el porcentaje α que garantiza el mayor beneficio posible de un uso sin perjudicar el otro.

Tabla 12: Escenarios Evaluados

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Mes correspondiente a un año de hidrología real de tipo normal (1993-1994)	Mes correspondiente a un año de hidrología real de tipo seca (1999-2000)	Mes correspondiente a una hidrología sintética de tipo normal (representado por caudal medio mensual con probabilidad de excedencia 50%)	Mes correspondiente a una hidrología sintética de tipo seca (representado por caudal medio mensual con probabilidad de excedencia 85%)

1. Análisis de *tradeoffs* usos in situ recreativos y usos extractivos durante mes de Febrero.

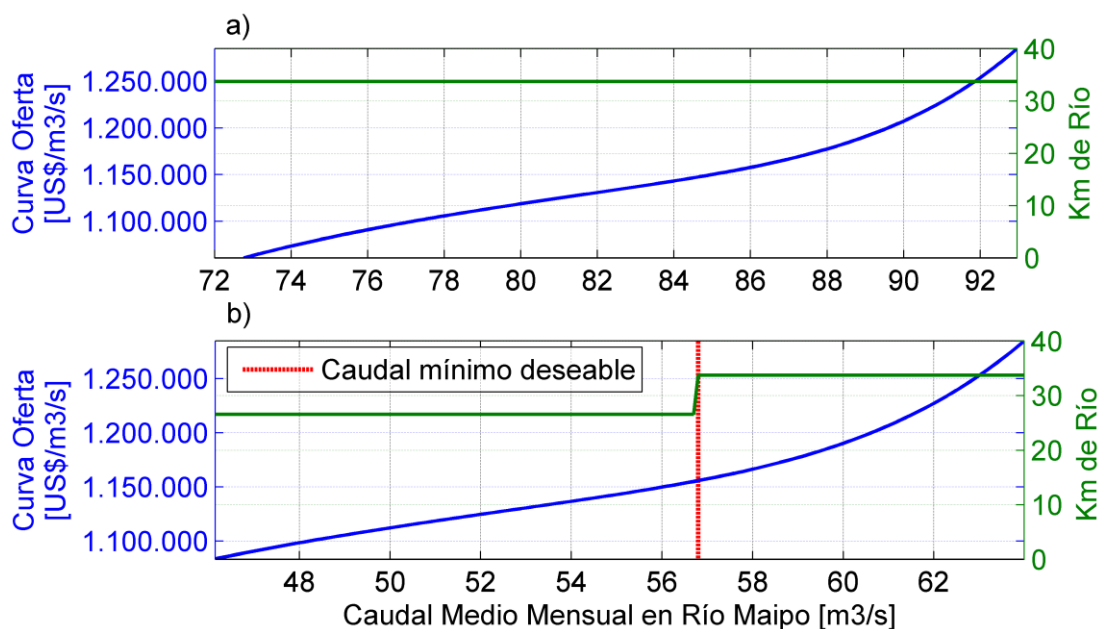


Figura 30: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en febrero en río Maipo para a) Escenario 1, b) Escenario 2

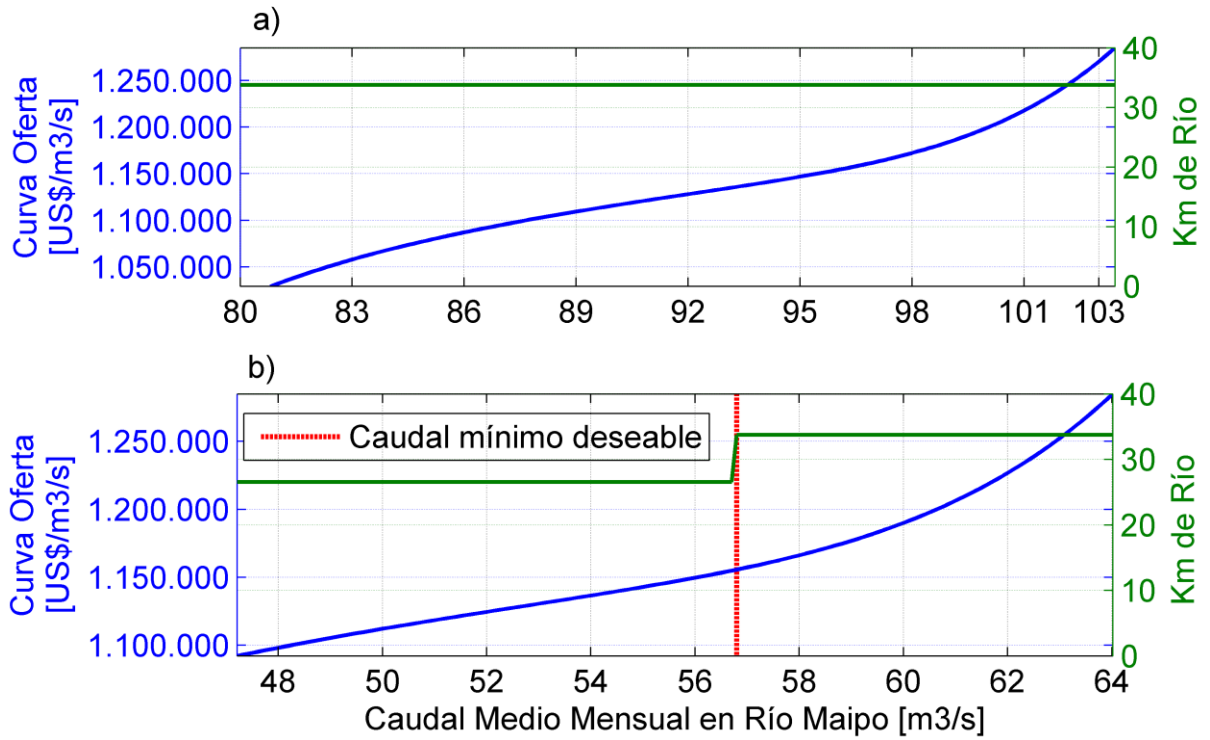


Figura 31: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en febrero en río Maipo para a) Escenario 3, b) Escenario 4.

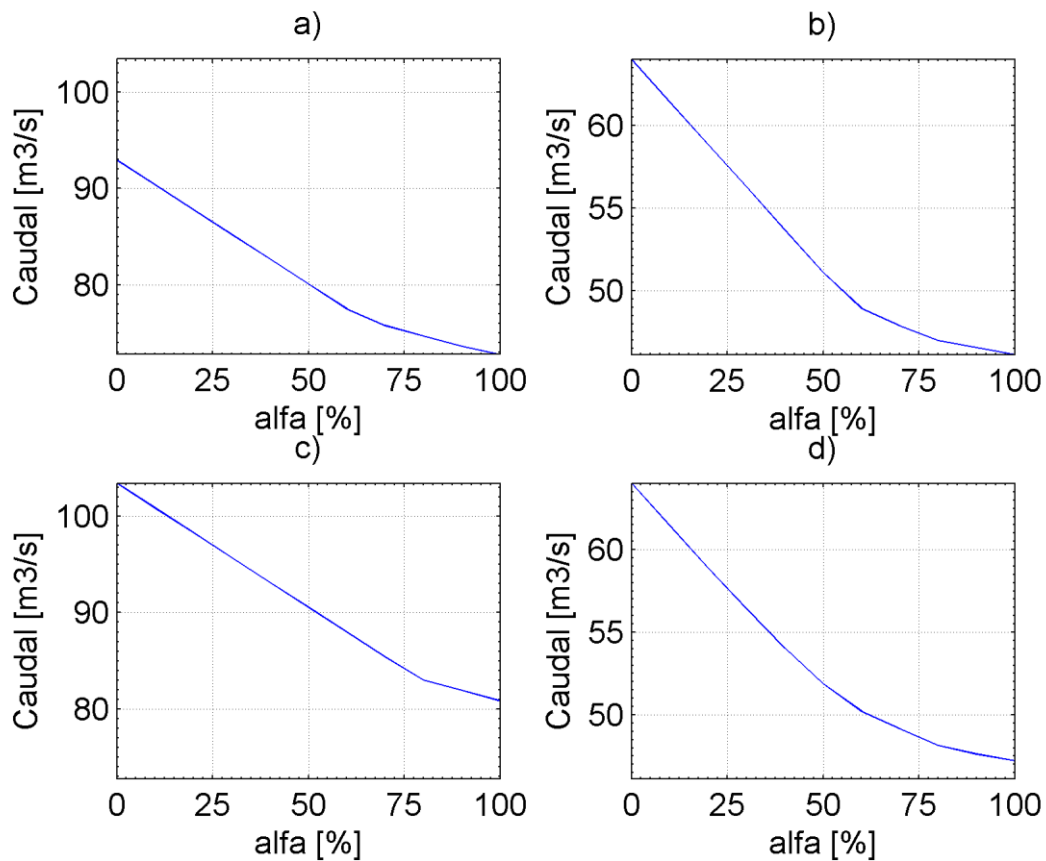


Figura 32: Caudal medio en febrero en río Maipo en función del porcentaje α . a) Escenario 1, b) Escenario 2, c) Escenario 3 y d) Escenario 4.

Tabla 13: Resumen resultados mes de febrero en escenario 2

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	64.0	33.75	19.48278	100	62	3.00	0
10	61.4	33.75	16.32077	100	59	3.00	3.16201
20	58.8	33.75	13.36267	100	58	3.00	6.12011
30	56.3	26.55	10.59629	99	57	2.98	8.88649
40	53.7	26.55	7.77016	99	54	2.94	11.71262
50	51.1	26.55	5.00888	99	50	2.89	14.4739
60	48.9	26.55	2.74514	98	44	2.86	16.73764
70	47.9	26.55	1.74469	97	45	2.84	17.73809
80	47.0	26.55	0.86251	96	43	2.82	18.62027
90	46.6	26.55	0.47658	96	43	2.82	19.00619
100	46.1	26.55	0	96	42	2.81	19.48278

Tabla 14: Resumen resultados mes de febrero en escenario 4

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	64.0	33.75	18.42584	100	62	3.00	0
10	61.4	33.75	15.26383	100	59	3.00	3.16201
20	58.9	33.75	12.41757	100	58	3.00	6.00827
30	56.4	26.55	9.64907	99	57	2.98	8.77677
40	54.0	26.55	7.03647	99	54	2.94	11.38937
50	51.9	26.55	4.79303	99	50	2.91	13.63281
60	50.2	26.55	3.01646	98	47	2.88	15.40938
70	49.1	26.55	1.89062	98	44	2.86	16.53522
80	48.1	26.55	0.88622	97	45	2.84	17.53962
90	47.6	26.55	0.39166	97	44	2.83	18.03418
100	47.2	26.55	0	96	43	2.83	18.42584

De los resultados de las curvas de oferta para los cuatro escenarios se observa que ésta presenta un aumento de pendiente significativo para porcentajes de α menores al 20%. Esto significa que si se limita al PHAM extraer menos del 20% de sus derechos la pérdida por extraer una unidad menos de agua es significativamente mayor, y por ende el costo de oportunidad es muy alto.

Los resultados para los escenarios 1 y 3 muestran que la cantidad de kilómetros de río continuos con nivel sobre aceptable se mantiene en su máximo (33.75 km) desde un α 0% hasta un α 100%. Además estos caudales se encuentran dentro del rango deseable definido en sección 4.3 como aquel en donde la mayor cantidad de perfiles presenta nivel sobre satisfactorio. Por lo tanto la asignación óptima corresponde a situación sin limitaciones, es decir, el PHAM puede extraer el 100% de sus derechos.

Para los escenarios 2 y 4 se tienen dos soluciones eficientes. La primera beneficia al PHAM y la segunda a las actividades recreativas. Para un α del 30% al 100% la cantidad de kilómetros se mantiene constante en 26.55 km, y para un α del 0% al 30% la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable se mantiene en su máximo (33.75 km). Si bien la disminución de kilómetros para la primera solución no es despreciable (7 km aproximadamente), la cantidad de kilómetros continua siendo bastante alta y los indicadores de beneficio de las actividades de rafting y kayak presentados en Tablas 13 y 14 no presentan fuertes cambios. En cuanto a la segunda solución se observa que el costo de oportunidad por mantener 7 km más de río con nivel sobre aceptable es mayor a 10 millones de dólares en ambos escenarios.

La Tabla 15 presenta las asignación(es) eficiente(s) para febrero en cada escenario incorporando la cantidad de kilómetros de río Maipo con nivel sobre aceptable que garantiza la asignación dada con el respectivo costo de oportunidad del PHAM.

Tabla 15: Asignaciones óptimas en febrero

Asignación Eficiente		Escenario	Escenario	Escenario	Escenario
		1	2	3	4
1	α [%]	100	100	100	100
	Km de río	33.75	26.55	33.75	26.55
	Costo Op. [10^6 US\$]	0	0	0	0
2	α [%]	-	28	-	28
	Km de río	-	33.75	-	33.75
	Costo Op. [10^6 US\$]	-	11.146	-	10.088

2. Análisis de *tradeoffs* usos in situ recreativos y usos extractivos durante mes de Marzo.

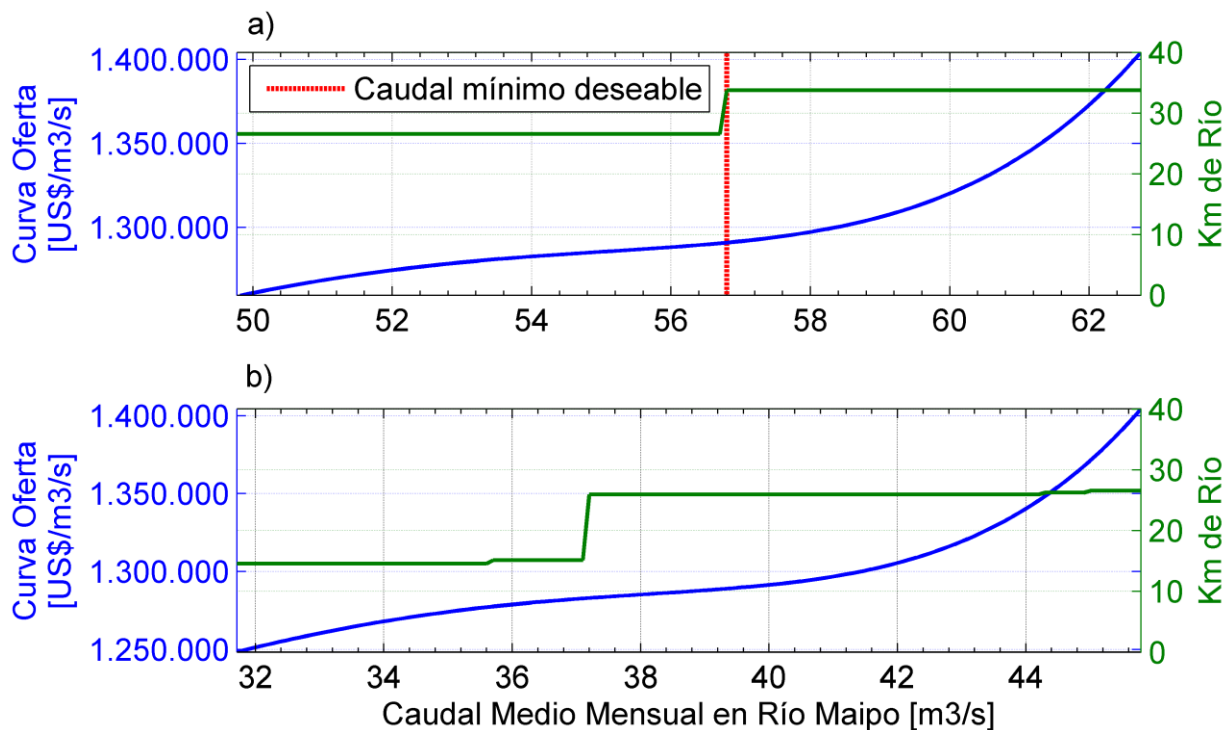


Figura 33: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en marzo en río Maipo para a) Escenario 1, b) Escenario 2.

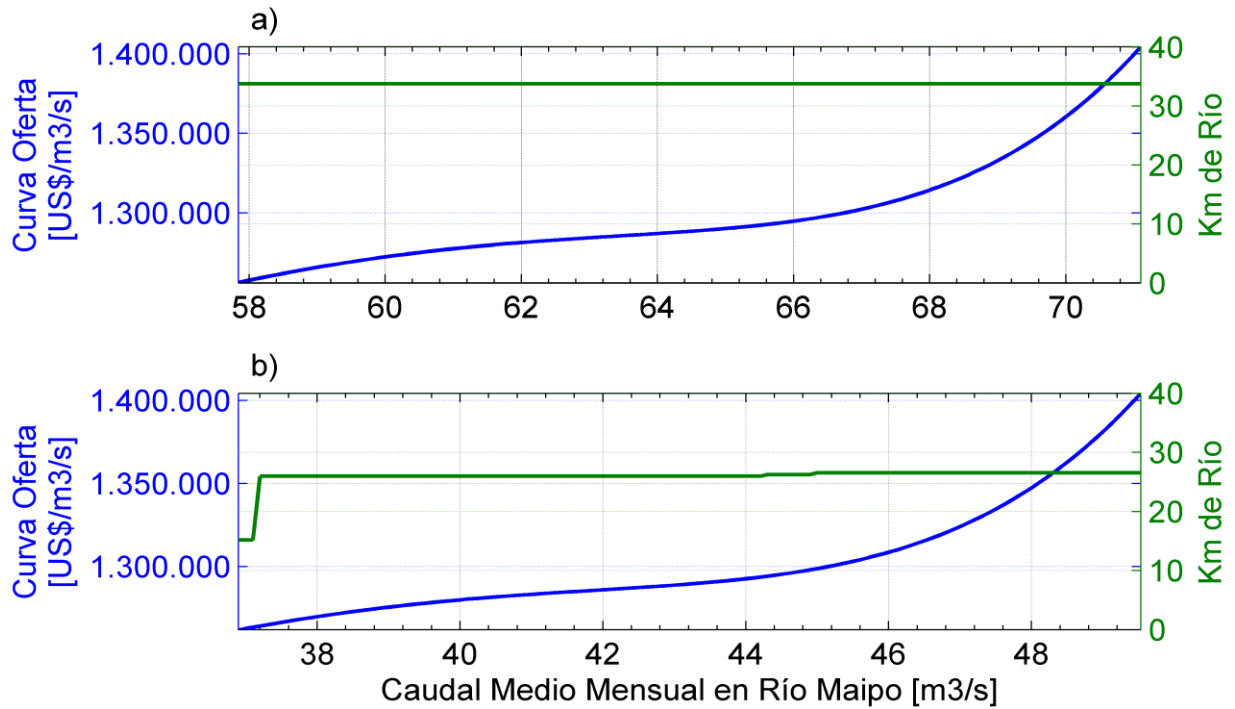


Figura 34: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en marzo en río Maipo para a) Escenario 3, b) Escenario 4.

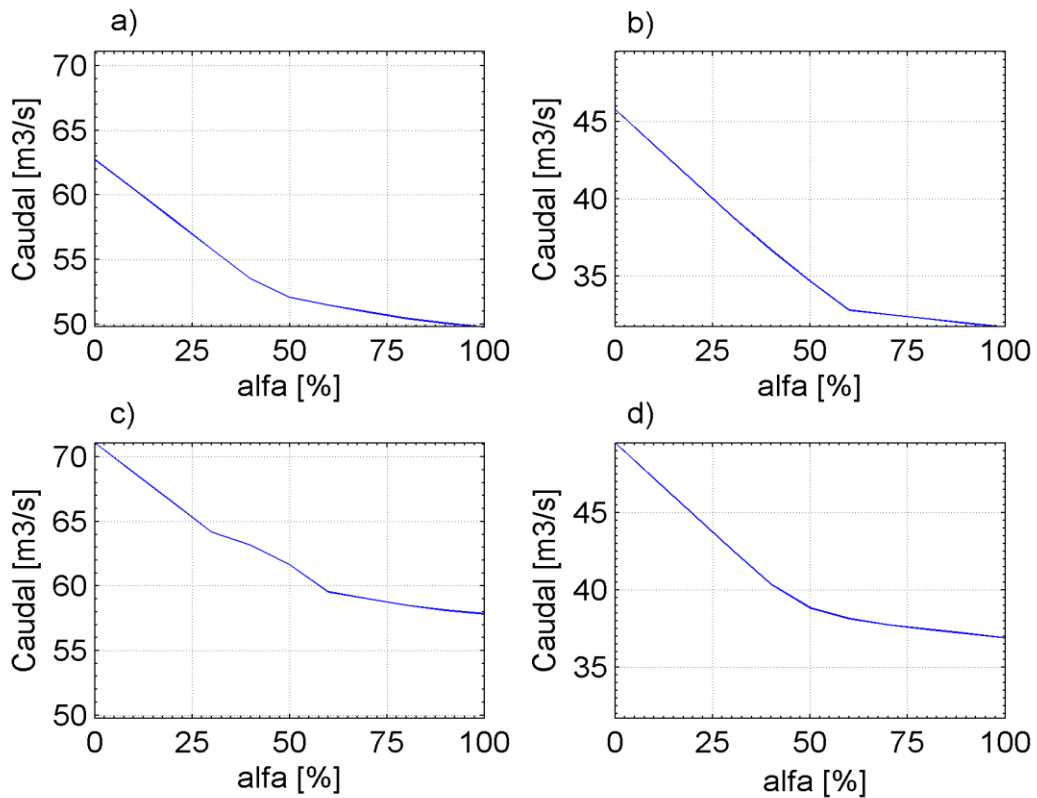


Figura 35: Caudal medio en marzo en río Maipo en función del porcentaje α . a) Escenario 1, b) Escenario 2, c) Escenario 3 y d) Escenario 4.

Tabla 16: Resumen resultados mes de marzo en escenario 1

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	62.7	33.75	16.29421	100	59	3.00	0
10	60.4	33.75	13.23436	100	58	3.00	3.05985
20	58.1	33.75	10.31657	100	58	3.00	5.97764
30	55.8	26.55	7.40421	99	56	2.97	8.88999
40	53.5	26.55	4.4985	99	54	2.93	11.79571
50	52.1	26.55	2.75894	99	50	2.91	13.53527
60	51.5	26.55	2.02546	99	50	2.90	14.26875
70	50.9	26.55	1.30103	99	50	2.89	14.99318
80	50.4	26.55	0.70505	98	47	2.88	15.58916
90	50.1	26.55	0.3511	98	47	2.88	15.94311
100	49.8	26.55	0	98	46	2.87	16.29421

Tabla 17: Resumen resultados mes de marzo en escenario 2

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	45.8	26.55	17.66814	96	40	2.80	0
10	43.5	25.95	14.60829	94	37	2.76	3.05985
20	41.2	25.95	11.6905	93	35	2.72	5.97764
30	38.9	25.95	8.77815	91	34	2.68	8.88999
40	36.7	15.15	5.99787	89	31	2.64	11.67027
50	34.7	14.55	3.52104	86	30	2.60	14.1471
60	32.8	14.55	1.25755	86	31	2.56	16.41059
70	32.5	14.55	0.91043	85	31	2.55	16.75772
80	32.2	14.55	0.56638	85	31	2.55	17.10177
90	32.0	14.55	0.33876	85	30	2.54	17.32939
100	31.7	14.55	0	85	30	2.54	17.66814

Tabla 18: Resumen resultados mes de marzo en escenario 4

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	49.5	26.55	15.94311	98	45	2.87	0
10	47.2	26.55	12.88326	96	43	2.83	3.05985
20	44.9	26.25	9.96547	96	40	2.79	5.97764
30	42.6	25.95	7.05312	93	36	2.75	8.88999
40	40.4	25.95	4.27284	93	35	2.71	11.67027
50	38.8	25.95	2.28502	91	34	2.68	13.6581
60	38.1	25.95	1.43182	91	31	2.66	14.51129
70	37.7	25.95	0.94993	91	30	2.66	14.99318
80	37.5	25.95	0.71066	91	31	2.65	15.23245
90	37.2	25.95	0.35396	91	31	2.65	15.58916
100	36.9	15.15	0	89	32	2.64	15.94311

De los resultados de las curvas de oferta para los cuatro escenarios se observa al igual que durante mes de febrero que éstas presentan un aumento de pendiente significativo para porcentajes de α menores al 20% aproximadamente. Esto significa que si se limita al PHAM extraer menos del 20% el costo de oportunidad es muy alto.

De los resultados se obtiene que para el escenario 1 se tienen dos soluciones eficientes. Para un α entre un 25% y 100% la cantidad de kilómetros se mantiene constante en 26.55 km, y para un α entre 0% y 25% la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable se mantiene en su máximo (33.75 km). Sin embargo, este aumento de 7 km aproximadamente tiene un costo de oportunidad cercano a los 8.5 millones de dólares.

Para el escenario 2, se tiene que la máxima cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable es de 26.55, la cual se alcanza para extracciones casi nulas (α cercanos a cero). Sin embargo, hasta un α de aproximadamente 40% la disminución de kilómetros de río es casi despreciable (de 0.6 km) y para valores mayores a éste la cantidad de kilómetros se reduce a aproximadamente 15 km. En cuanto al costo de oportunidad se observa que este aumenta bruscamente para porcentajes de α menores a 30% pero esto presenta insignificantes aumentos en el beneficio de actividades recreativas. De lo contrario para porcentajes entre 35% y 40% se presenta un importante aumento de beneficio para la recreación (más de 10 kilómetros de río) a un costo de oportunidad cercano a 6 millones de dólares.

Los resultados del escenario 3, muestran que los caudales siempre se mantienen dentro del rango definido como deseable. En consecuencia la asignación óptima corresponde a la situación sin limitaciones, es decir, el PHAM puede extraer el 100% de sus derechos.

Finalmente el escenario 4 muestra que la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable se mantiene alto (mayor a 25 km) hasta porcentajes de extracción del 90% presentando un costo de oportunidad bastante bajo (aproximadamente 350 mil dólares) y luego disminuye bruscamente a casi 15 km cuando PHAM opera sin restricciones.

La Tabla 19 presenta las asignación(es) eficiente(s) para marzo en cada escenario incorporando la cantidad de kilómetros de río Maipo con nivel sobre aceptable que garantiza la asignación dada con el respectivo costo de oportunidad del PHAM.

Tabla 19: Asignaciones óptimas en marzo

Asignación Eficiente	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
α [%]	100	100	100	100
1 Km de río	26.55	14.55	33.75	15.15
Costo Op. [10^6 US\$]	0	0	0	0
α [%]	25	45	-	90
2 Km de río	33.75	15.15		25.95
Costo Op. [10^6 US\$]	8.672	4.75		0.354
α [%]	-	40	-	24
3 Km de río		25.95		26.25
Costo Op. [10^6 US\$]		6.627		9.207
α [%]	-	0.8	-	20
4 Km de río		26.25		26.55
Costo Op. [10^6 US\$]		15.644		9.965
α [%]	-	0.5	-	-
5 Km de río		26.55		
Costo Op. [10^6 US\$]		16.571		

3. Análisis de *tradeoffs* usos in situ recreativos y usos extractivos durante mes de Abril:

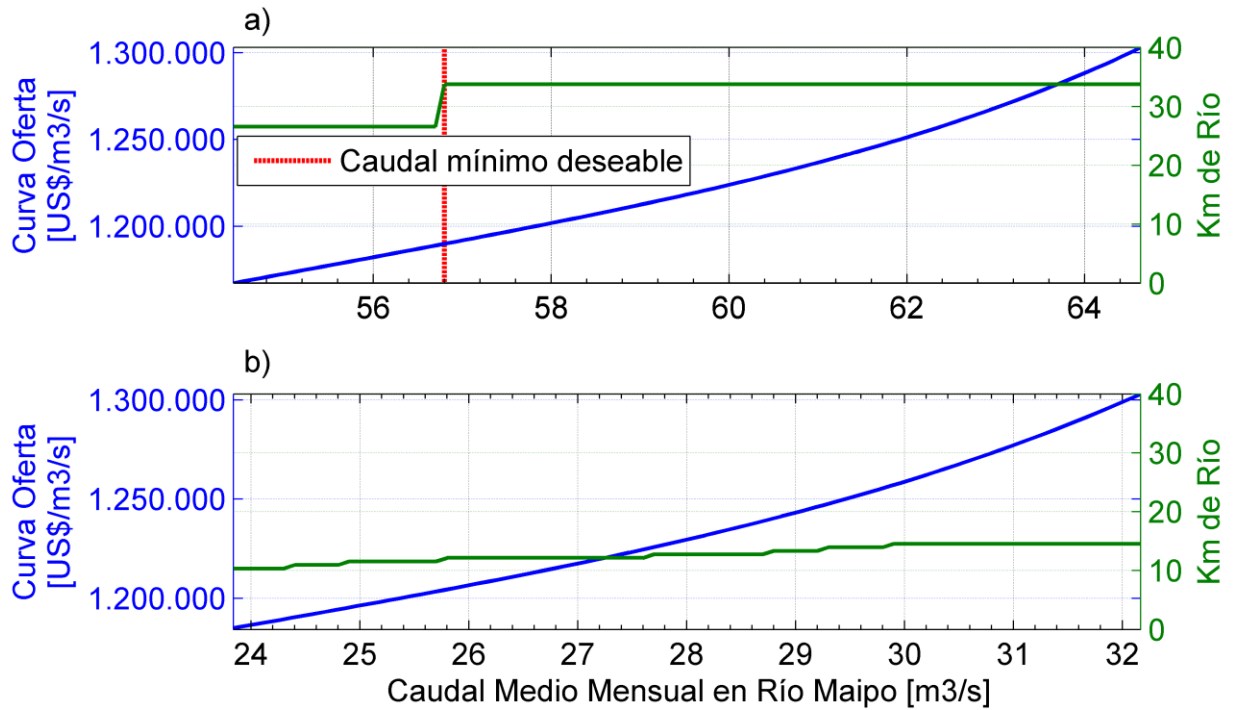


Figura 36: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en abril en río Maipo para a) Escenario 1, b) Escenario 2.

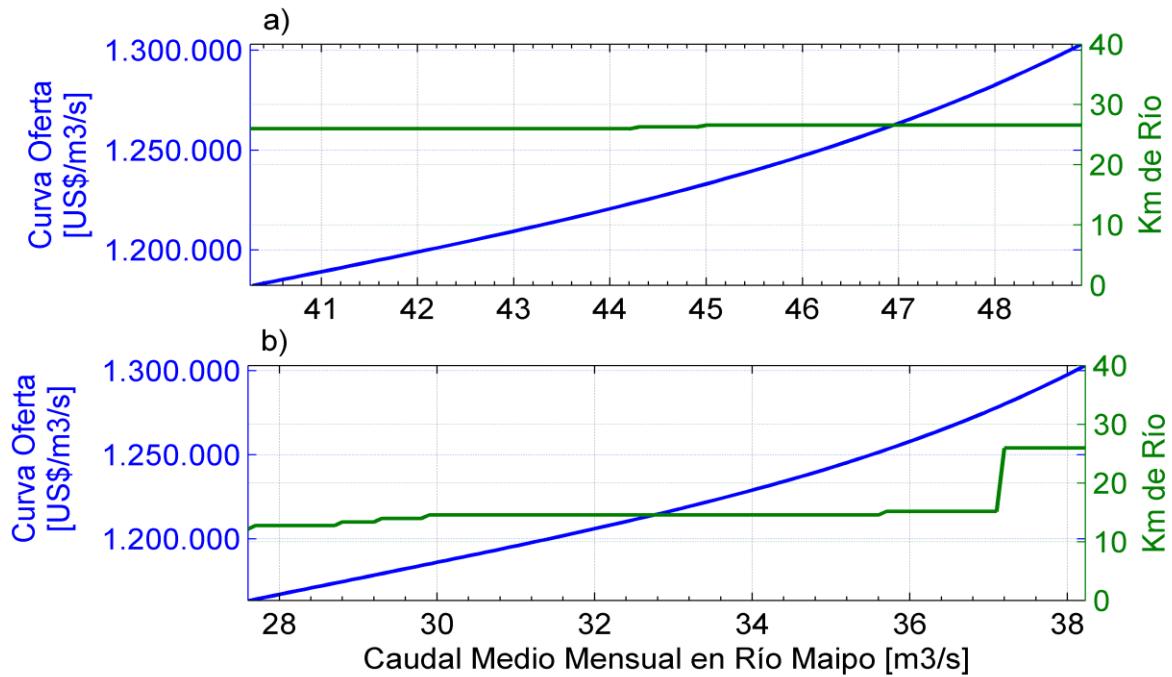


Figura 37: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en abril en río Maipo para a) Escenario 3, b) Escenario 4.

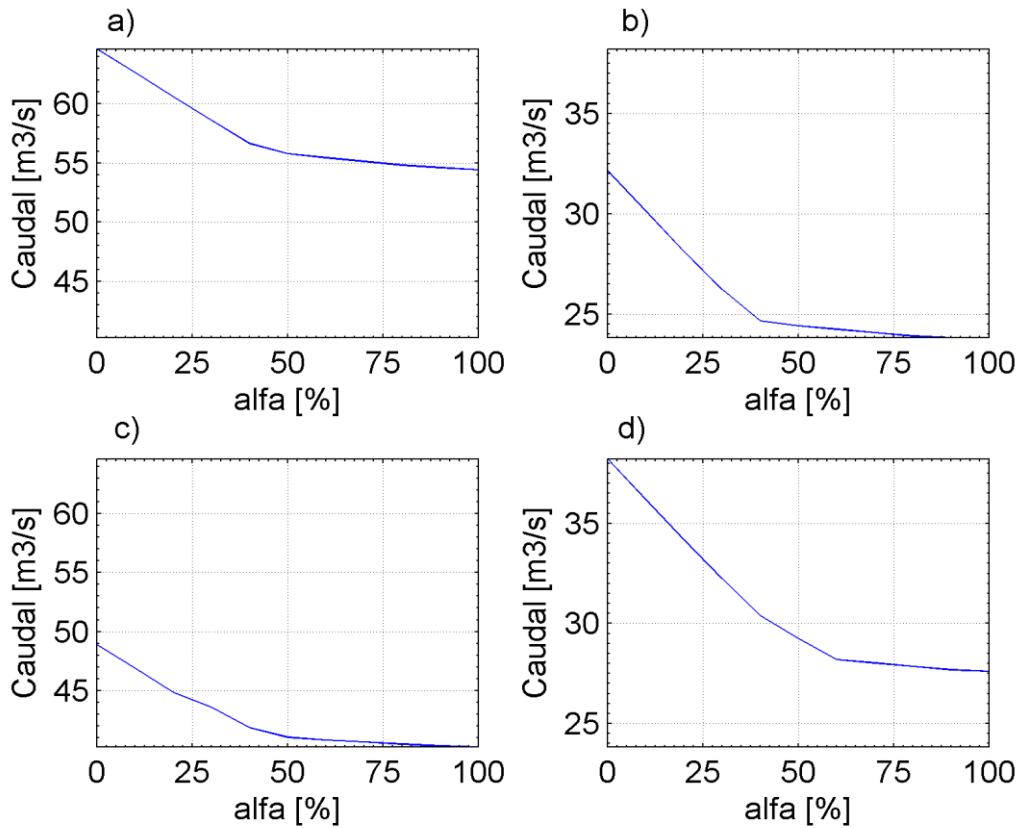


Figura 38: Caudal medio en abril en río Maipo en función del porcentaje α . a) Escenario 1, b) Escenario 2, c) Escenario 3 y d) Escenario 4.

Tabla 20: Resumen resultados mes de abril en escenario 1

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	64.6	33.75	11.9405	100	61	3.00	0
10	62.6	33.75	9.4146	100	59	3.00	2.5259
20	60.6	33.75	7.00586	100	58	3.00	4.93464
30	58.6	33.75	4.67626	100	59	3.00	7.26424
40	56.6	26.55	2.41265	99	57	2.99	9.52785
50	55.8	26.55	1.52558	99	56	2.97	10.41491
60	55.4	26.55	1.08615	99	56	2.97	10.85435
70	55.1	26.55	0.75842	99	54	2.96	11.18208
80	54.8	26.55	0.43229	99	54	2.96	11.5082
90	54.6	26.55	0.21578	99	54	2.95	11.72472
100	54.4	26.55	0	99	54	2.95	11.9405

Tabla 21: Resumen resultados mes de abril en escenario 2

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	32.2	14.55	9.97273	84.96	30.97	2.55	0
10	30.2	14.55	7.44683	84.07	29.20	2.51	2.5259
20	28.1	12.75	4.91992	76.99	28.32	2.46	5.05281
30	26.2	12.15	2.7085	75.22	25.66	2.42	7.26424
40	24.7	10.95	1.00471	69.91	24.78	2.38	8.96802
50	24.4	10.95	0.66832	69.03	24.78	2.38	9.30441
60	24.2	10.35	0.44488	67.26	24.78	2.37	9.52785
70	24.1	10.35	0.33341	67.26	24.78	2.37	9.63932
80	23.9	10.35	0.11097	67.26	23.89	2.36	9.86176
90	23.8	10.35	0	67.26	23.89	2.36	9.97273
100	23.8	10.35	0	67.26	23.89	2.36	9.97273

Tabla 22: Resumen resultados mes de abril en escenario 3

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	48.9	26.55	10.19416	98	44	2.86	0
10	46.887	26.55	7.66826	96	43	2.82	2.5259
20	44.874	26.25	5.25952	96	40	2.79	4.93464
30	43.623	25.95	3.7375	94	37	2.76	6.45667
40	41.864	25.95	1.79004	93	35	2.73	8.40412
50	41.065	25.95	0.88975	93	35	2.72	9.30441
60	40.834	25.95	0.55484	93	35	2.71	9.63932
70	40.663	25.95	0.44354	93	35	2.71	9.75063
80	40.492	25.95	0.22143	93	35	2.71	9.97273
90	40.321	25.95	0	93	35	2.70	10.19416
100	40.26	25.95	0	93	35	2.70	10.19416

Tabla 23: Resumen resultados mes de abril en escenario 4

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	38.2	25.95	12.36982	91	32	2.66	0
10	36.2	15.15	9.84392	88	31	2.63	2.5259
20	34.2	14.55	7.43518	86	29	2.59	4.93464
30	32.2	14.55	5.10559	85	31	2.55	7.26424
40	30.4	14.55	3.06541	84	30	2.51	9.30441
50	29.3	13.95	1.84479	82	28	2.49	10.52503
60	28.2	12.75	0.64511	77	28	2.46	11.72472
70	28.0	12.75	0.42933	77	28	2.46	11.9405
80	27.8	12.75	0.21429	77	27	2.45	12.15553
90	27.7	12.75	0.10705	77	27	2.45	12.26277
100	27.6	12.15	0	76	27	2.45	12.36982

De los resultados de las curvas de oferta para los cuatro escenarios se observa que se tiene una pendiente bastante pronunciada y prácticamente constante. Esto significa que la pérdida por mantener una unidad más de caudal en el río aumenta de manera aproximadamente lineal en todo el rango de caudales evaluados.

De los resultados se obtiene que para el escenario 1 se tienen dos soluciones eficientes. Para un α entre un 40% y 100% la cantidad de kilómetros se mantiene constante en

26.55 km, y para un α entre 0% y 40% la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable se mantiene en su máximo (33.75 km). Este aumento de 7 km aproximadamente tiene un costo de oportunidad cercano a los 2.5 millones de dólares.

Para el escenario 2, se tiene que la máxima cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable es de 14.55 y disminuye hasta llegar a un mínimo de 10.35 km cuando el porcentaje α es del 100%. En consecuencia el presente escenario no presenta condiciones buenas para las actividades recreativas de rafting y kayak y prácticamente el PHAM imposibilita su práctica.

Los resultados del escenario 3, muestran que la cantidad de kilómetros para practicar rafting y kayak no presenta importantes disminuciones, siendo la mayor de estas de 0.6 kilómetros. Luego se considera que PHAM no afecta la práctica de actividades durante abril en el presente escenario.

Finalmente, el escenario 4 muestra que la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable es mayor a 25 km para porcentajes de α cercanos al 10% y luego disminuye fuertemente. En consecuencia el costo de oportunidad para que las actividades recreativas presenten un alto beneficio es muy alto (cercano a los 11 millones de dólares).

La Tabla 24 presenta las asignación(es) eficiente(s) para abril en cada escenario incorporando una estimación de la cantidad de kilómetros de río Maipo con nivel sobre aceptable que garantiza la asignación dada con el respectivo costo de oportunidad del PHAM.

Tabla 24: Asignaciones óptimas en abril

Asignación Eficiente		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	α [%]	100	100	100	100
	Km de río	26.55	10.35	25.95	12.15
	Costo Op. [10^6 US\$]	0	0	0	0
2	α [%]	40	50	25	98
	Km de río	33.75	10.95	26.25	12.75
	Costo Op. [10^6 US\$]	2.413	0.668	4.553	0.107
3	α [%]	-	41	20	54
	Km de río		11.55	26.55	13.35
	Costo Op. [10^6 US\$]		1.23	5.259	1.297
4	α [%]	-	35	-	50
	Km de río		12.15		13.95
	Costo Op. [10^6 US\$]		2.251		1.845
5	α [%]	-	23	-	45
	Km de río		12.75		14.55
	Costo Op. [10^6 US\$]		4.449		2.508
6	α [%]	-	18	-	15
	Km de río		13.35		15.15
	Costo Op. [10^6 US\$]		5.751		9.233
7	α [%]	-	15	-	10
	Km de río		13.95		25.95
	Costo Op. [10^6 US\$]		6.351		9.844
8	α [%]	-	11	-	-
	Km de río		14.55		
	Costo Op. [10^6 US\$]		7.079		

4. Análisis de *tradeoffs* usos in situ recreativos y usos extractivos durante mes de Octubre.

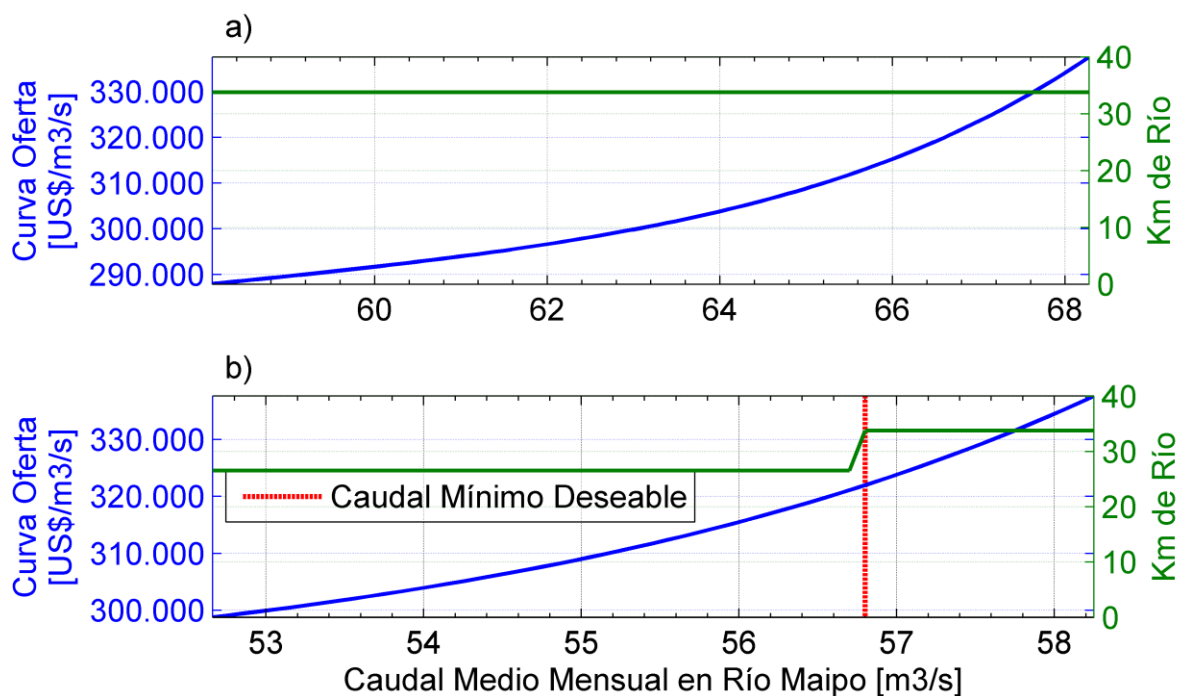


Figura 39: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en octubre en río Maipo para a) Escenario 1, b) Escenario 2.

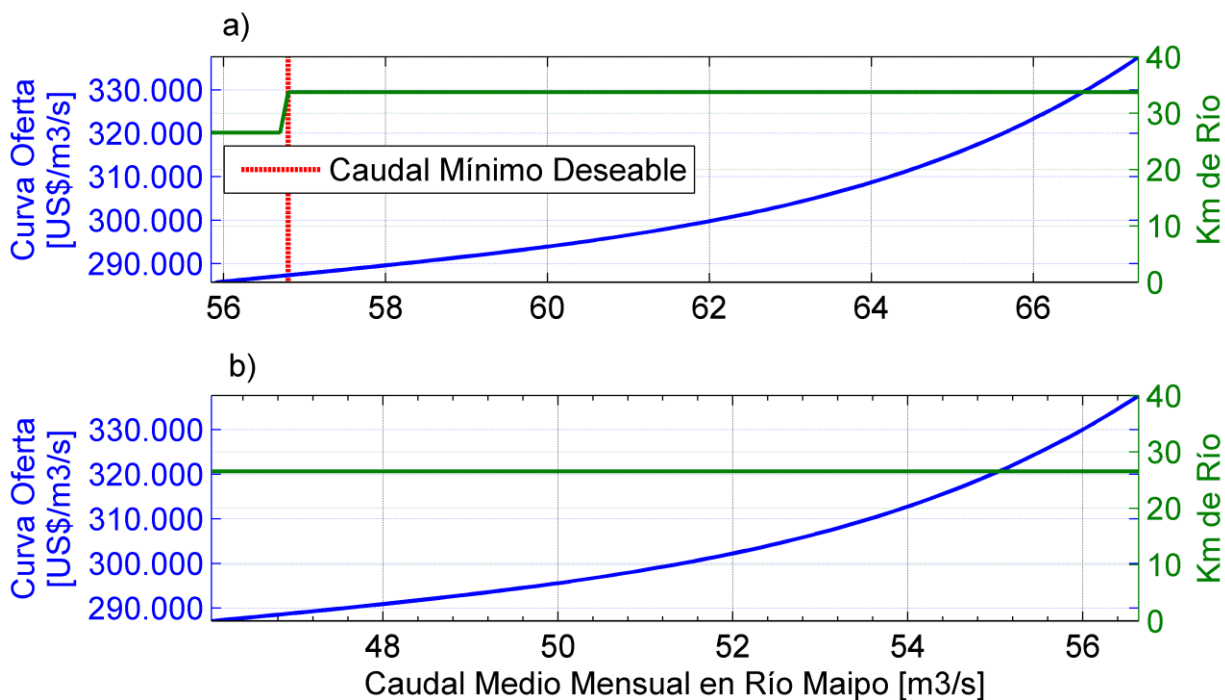


Figura 40: Curva de oferta e indicador de beneficio uso recreativo de rafting y kayak en marzo en río Maipo para a) Escenario 3, b) Escenario 4.

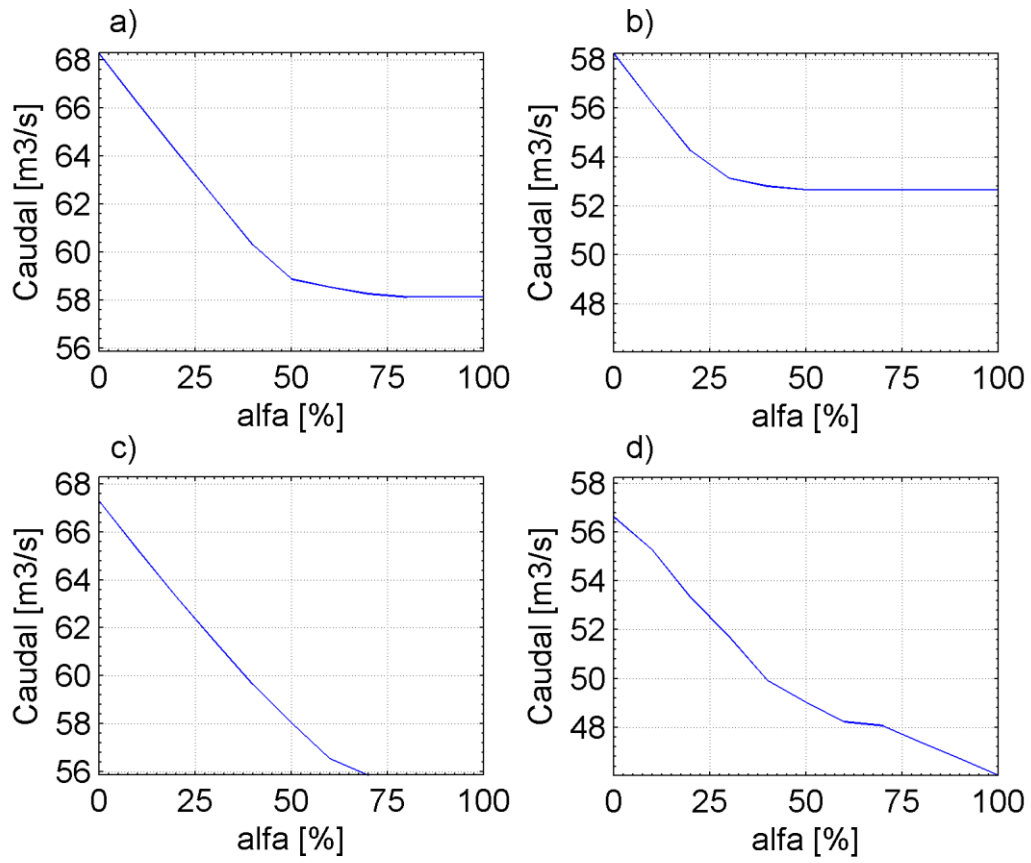


Figura 41: Caudal medio en marzo en río Maipo en función del porcentaje α . a) Escenario 1, b) Escenario 2, c) Escenario 3 y d) Escenario 4

Tabla 25: Resumen resultados mes de octubre en escenario 2

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	58.3	33.75	1.67677	100	59	3.00	0
10	56.2	26.55	1.01065	99	57	2.98	0.66612
20	54.3	26.55	0.45359	99	54	2.95	1.22317
30	53.1	26.55	0.11254	99	53	2.93	1.56422
40	52.8	26.55	0.02809	99	53	2.92	1.64868
50	52.7	26.55	0	99	52	2.92	1.67677
60	52.7	26.55	0	99	52	2.92	1.67677
70	52.7	26.55	0	99	52	2.92	1.67677
80	52.7	26.55	0	99	52	2.92	1.67677
90	52.7	26.55	0	99	52	2.92	1.67677
100	52.7	26.55	0	99	52	2.92	1.67677

Tabla 26: Resumen resultados mes de octubre en escenario 3

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	67	33.75	3.26514	100	60	3.00	0
10	65	33.75	2.62923	100	60	3.00	0.63591
20	63	33.75	2.04197	100	62	3.00	1.22317
30	61	33.75	1.53228	100	59	3.00	1.73287
40	60	33.75	1.00419	100	58	3.00	2.26095
50	58	33.75	0.56578	100	58	3.00	2.69937
60	57	26.55	0.16044	99	57	2.99	3.1047
70	56	26.55	0	99	56	2.97	3.26514
80	56	26.55	0	99	56	2.97	3.26514
90	56	26.55	0	99	56	2.97	3.26514
100	56	26.55	0	99	56	2.97	3.26514

Tabla 27: Resumen resultados mes de octubre en escenario 4

α [%]	$Q_{\text{río}}$ [m ³ /s]	Km de río	Costo Op. [10 ⁶ US\$]	A [%]	S [%]	B_c	B_{PHAM} [10 ⁶ US\$]
0	56.6	26.55	3.051	99	57	2.99	0
10	55.3	26.55	2.63006	99	56	2.96	0.42094
20	53.3	26.55	2.02996	99	53	2.93	1.02104
30	51.7	26.55	1.57152	99	50	2.90	1.47948
40	49.9	26.55	1.06695	98	46	2.87	1.98405
50	49.0	26.55	0.81764	98	44	2.86	2.23336
60	48.2	26.55	0.59752	97	45	2.84	2.45348
70	48.1	26.55	0.57011	97	45	2.84	2.48089
80	47.4	26.55	0.37886	97	43	2.83	2.67214
90	46.7	26.55	0.1888	96	43	2.82	2.8622
100	46.0	26.55	0	96	42	2.81	3.051

De los resultados de las curvas de oferta para los cuatro escenarios se observa que la curva presenta una forma exponencial. Luego el aumento de pérdida monetaria por mantener una unidad de agua más en el cauce crece exponencialmente a medida que las extracciones de caudal para PHAM disminuyen. Por otro lado se tienen que estos costos marginales son bastante inferiores en comparación a los otros meses. Esto se debe a que el precio de la energía en febrero es considerablemente menor al resto de los meses del año.

A partir de los resultados se observa que para el escenario 1 solo se tiene solo una asignación eficiente (porcentaje α del 100%). Las extracciones del PHAM no son suficientes como para afectar las actividades recreativas ya que la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable se mantiene en su máximo (33.75 km).

El segundo escenario muestra dos soluciones eficientes. Para un α entre un 5% y 100% la cantidad de kilómetros se mantiene constante en 26.55 km, y para un α entre 0% y 5% la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable se mantiene en su máximo (33.75 km). Este aumento de 7 km aproximadamente tiene un costo de oportunidad cercano a 1 millones de dólares. Por otro lado la Figura 41 muestra que la cantidad de agua mantenida en el cauce no varía para α mayores a 40%, esto se debe a que durante octubre del año 1999-2000 el embalse el Yeso descargo caudales muy bajos y estos no son suficientes como para que PHAM pueda extraer ni la mitad de su derecho.

Los resultados del escenario 3, muestran al igual que el segundo escenario, dos soluciones eficientes. Para un α entre un 53% y 100% la cantidad de kilómetros se mantiene constante en 26.55 km, y para un α entre 0% y 53% la cantidad de kilómetros

con nivel sobre aceptable se mantiene en su máximo (33.75 km). Este aumento de 7 km aproximadamente tiene un costo de oportunidad cercano a 250 mil dólares, lo cual es bastante poco en comparación con otros meses.

Finalmente el escenario 4 muestra que la cantidad de kilómetros con nivel sobre aceptable se mantiene en los 26.55 km para todos los porcentajes α de extracción. En consecuencia existe solo una asignación eficiente, esta corresponde a que el PHAM pueda extraer el 100% de sus derechos.

La Tabla 28 presenta las asignación(es) eficiente(s) para octubre en cada escenario incorporando la cantidad de kilómetros de río Maipo con nivel sobre aceptable que garantiza la asignación dada con el respectivo costo de oportunidad del PHAM.

Tabla 28: Asignaciones óptimas en octubre

Asignación Eficiente		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	α [%]	100	100	100	100
	Km de río	33.75	26.55	26.55	26.55
	Costo Op. [10^6 US\$]	0	0	0	0
2	α [%]		5	53	-
	Km de río		33.75	33.75	
	Costo Op. [10^6 US\$]		1.194	0.241	

La Figura 42 resume los resultados de las asignaciones eficientes obtenidas para los meses de febrero, marzo, abril y octubre. El eje vertical indica el costo de oportunidad del PHAM y el eje horizontal el beneficio de las actividades de rafting y kayak medido a partir de la cantidad de kilómetros continuo de río con nivel sobre aceptable. Estos indican que los meses de marzo y abril presentan fuertes alteraciones negativas en las actividades recreativas con la puesta en operación del PHAM, por consiguiente las restricciones aplicadas generan numerosas asignaciones óptimas, donde las más restrictivas aumentan considerablemente la calidad de la recreación a un alto costo de oportunidad. Los meses de febrero y octubre se ven afectados en menor medida por el PHAM y además presentan como máximo dos soluciones óptimas por cada escenario.

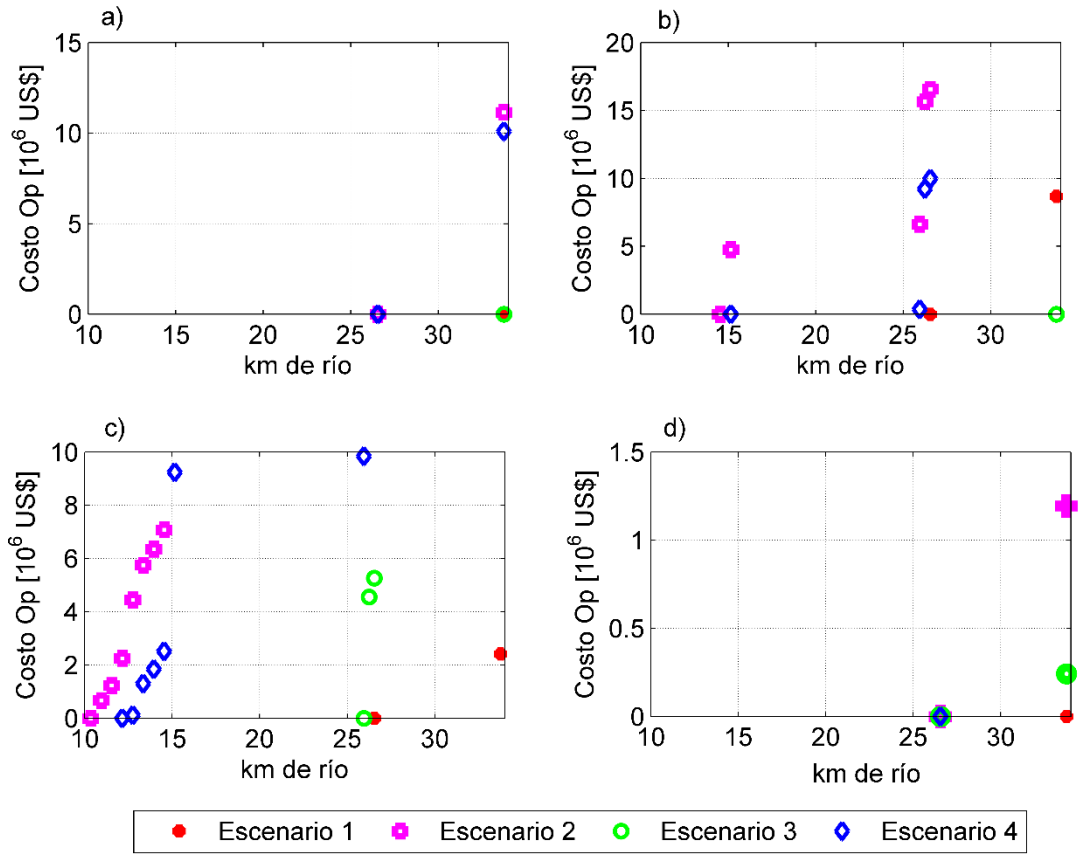


Figura 42: Soluciones eficientes para los cuatro escenarios en a) Febrero, b) Marzo, c) Abril, d) Octubre.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología para analizar los *tradeoffs* entre los usos in situ asociados a recreación y usos extractivos, para identificar asignaciones eficientes de agua entre estos usos. El método tiene como objetivo obtener las asignaciones de agua para cada uso, tal que se presente un cierto beneficio del uso in situ recreativo (medido cualitativamente) con la menor pérdida de beneficio económico del uso extractivo. Esto último se traduce en minimizar el déficit de agua del uso extractivo, el cual representa la diferencia entre la extracción máxima utilizable por el uso extractivo y la cantidad de agua realmente extraída sujeta a restricciones que apunten a mantener usos in situ. Estas restricciones consisten en limitar los derechos de agua otorgados, estableciendo que se puede extraer un porcentaje fijo de estos. Los beneficios asociados a ambos usos se consideran de igual prioridad. Sin embargo, al no tener las mismas unidades de medida del beneficio, no es posible aplicar modelos de asignación basados en maximizar beneficio agregado de los usos en conflicto. En consecuencia el modelo permite encontrar soluciones eficientes en el sentido de Pareto, es decir, aquellas asignaciones en que no es posible mejorar el beneficio para un uso sin perjudicar el otro.

En cuanto al cálculo de beneficios de usos recreativos, se presenta una metodología para cuantificar el rango de caudal necesario para desarrollar las actividades recreativas, permitiendo asignar un beneficio cualitativo a estas actividades en función del caudal y de esta manera encontrar la cantidad de kilómetros de río continuo que garantizan la práctica de estas actividades.

Al aplicar la metodología al caso de la cuenca alta del río Maipo, las curvas de beneficio cualitativo de uso recreativo en función del caudal presentan una forma cóncava, donde el 80% de los perfiles del río presentan un nivel sobre aceptable a los 29 [m^3/s] aproximadamente y el beneficio óptimo para la mayor cantidad de perfiles se obtiene para caudales entre 57 [m^3/s] y 112 [m^3/s]. Estos valores son semejantes a los resultados presentados por estudios internacionales, tales como los propuestos por Shelby (1992) donde los niveles sobre aceptable se obtienen para caudales cercanos a los 28 [m^3/s] (1000 [$pies^3/s$]) y el rango óptimo se encuentra entre los 50 [m^3/s] (1800 [$pies^3/s$]) y 113 [m^3/s] (4000 [$pies^3/s$]).

Los beneficios económicos de usos extractivos del agua, asociados a actividades productivas, son estimados a partir de las ganancias generadas por la venta del producto final que depende directamente del insumo principal, es decir, de la cantidad de agua a captar. En consecuencia, es posible determinar el beneficio marginal, asociado a la ganancia económica por captar una unidad más de agua y por consiguiente, la pérdida de ganancia por captar una unidad menos de caudal. Para el caso de estudio, se determinaron las curvas de beneficio económico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), donde es posible observar aquellos meses en que la energía tiene un precio, medido como costo marginal del sistema eléctrico, más alto y por ende los costos de oportunidad son más significativos. Del beneficio marginal mensual del PHAM es posible observar el aumento del beneficio económico al aumentar una unidad más de caudal

generado. En estos se observa que las primeras unidades de caudal son bastante más valiosas en términos económicos en comparación con las últimas. Esto sucede producto del supuesto que las centrales hidroeléctricas operan en las horas del mes donde el precio de energía es más alto. Los resultados muestran que los meses de enero a abril presentan beneficios económicos marginales mensuales similares, en donde la ganancia por generar un m^3/s de agua adicional en un mes es del orden de un millón de dólares. Por el contrario durante los meses de octubre a diciembre la ganancia por generar un m^3/s adicional en un mes es del orden de medio millón de dólares, esta disminución se debe al bajo precio de venta de la energía durante estos meses.

La curva de oferta de usos in situ permite evaluar el costo marginal asociado a mantener una unidad más de caudal en el cauce, equivalente al costo de oportunidad del uso extractivo preferente, en este caso la producción de hidroelectricidad. En consecuencia la curva de oferta es la base para analizar los *tradeoffs* entre ambos usos.

Se efectuó una simulación de caudales medios mensuales en río Maipo desde desembocadura río Yeso hasta confluencia con río Colorado para la situación con PHAM operando. Estos caudales fueron evaluados en cuatro escenarios distintos. Los dos primeros corresponden a escenarios de una hidrología real, de tipo seca y normal, para un año, representadas por los registros mensuales observados asociados a un año donde se observa que su caudal medio anual es similar a los valores obtenidos de un análisis de frecuencia de dicha variable, con una probabilidad de excedencia de 85% y 50% respectivamente, estos años corresponden a los años hidrológicos 1999-2000 y 1993-1994 respectivamente. Los dos últimos corresponden a escenarios de una hidrología sintética, de tipo seca y normal, para un año, representadas al tomar los caudales mensuales asociados a las probabilidades de excedencia de 85% y 50% respectivamente, desde los análisis de frecuencia realizados independientes para cada mes.

Los resultados sugieren que la puesta en operación del proyecto tiene un efecto negativo sobre la práctica de las actividades realizadas en el cauce en los meses de febrero, marzo, abril y octubre bajos los escenarios de una hidrología real de tipo seca (año 1993-1994) y una hidrología sintética de tipo seca, disminuyendo la cantidad de kilómetros de río aptas para practicar las actividades recreativas, esto es, la cantidad de kilómetros con condiciones sobre aceptables para la práctica de actividades según la escala de beneficio cualitativo. El resto de los meses de verano (noviembre, diciembre y enero) no se generan conflictos entre estos usos debido a que los caudales durante estos meses son muy altos producto del régimen nival de la cuenca. Específicamente el proyecto disminuye la calidad del rafting y kayak en mayor o menor medida dependiendo del escenario evaluado. En los meses de marzo y abril bajo el escenario de una hidrología real de tipo normal (año 1993-1994) y en los meses de abril y octubre bajo el escenario de una hidrología sintética de tipo normal, las actividades presentan bajas en los niveles de calidad. Sin embargo, estas disminuciones no son muy significativas y las actividades se pueden desarrollar por un tramo de río suficientemente largo (aprox. 25 km). En cambio en un escenario de una hidrología real de tipo seca (año 1999-2000) y sintética de tipo

seca, el efecto del PHAM es altamente negativo en los meses de marzo y abril, disminuyendo la cantidad de kilómetros de río para practicar las actividades a menos de 16 km.

Al limitar las extracciones de agua para hidroelectricidad en los meses afectados, disminuyen los efectos sobre las actividades recreativas, con un respectivo costo de oportunidad asociado que varía según el mes, el escenario evaluado y el grado en que se limiten las extracciones para hidroelectricidad. En consecuencia, se tienen numerosas alternativas de asignación de agua entre los usos in situ recreativos y usos extractivos, en donde, a cada una de estas se le asocia un beneficio de las actividades recreativas y una pérdida monetaria por limitar las extracciones de agua. De esta manera, es posible evaluar que algunas restricciones constituyen soluciones inferiores que otras, es decir, aquellas en donde un aumento del déficit de agua del uso extractivo y por ende un mayor costo de oportunidad no presenta una mejoría en la calidad de las actividades recreativas, basándose en el indicador que mide la cantidad de kilómetros de río con nivel sobre aceptable.

Se identificaron asignaciones eficientes que garantizan una cierta cantidad de kilómetros de río para la práctica de rafting y kayak al menor costo de oportunidad posible. En general se observa que aumentos significativos en la cantidad de kilómetros presentan altos costos de oportunidad y pequeños aumentos de kilómetros, bajos costos de oportunidad. Sin embargo, existen casos particulares durante meses de marzo y abril donde pequeños aumentos en la calidad de la recreación presentan elevados costos de oportunidad. Esto sucede producto de la forma de la curva de kilómetros de río con nivel sobre aceptable en función del caudal, en la cual se observan rangos amplios de caudales donde la cantidad de kilómetros no se altera. Esto se debe a la naturaleza discreta de la escala de beneficio cualitativo. En consecuencia, se requieren aumentos significativos de caudal para lograr aumentar la cantidad de kilómetros continuos que garantizan la práctica de la actividad. Estos aumentos significativos de caudal están ligados a altos costo de oportunidad. En otros casos, en algunos tramos, pequeñas variaciones en el caudal provocan que el nivel de calidad en algunos perfiles bajen del nivel aceptable o lo superen y por ende disminuyen o aumentan considerablemente la cantidad de kilómetros continuos que garantizan la práctica de estas actividades. En consecuencia, al tener pequeños cambios de caudal los costos de oportunidad son bajos. Por último, existen casos donde se tienen importantes aumentos en la calidad de la recreación a bajos costos de oportunidad como ocurre en octubre debido a que el precio de la energía durante este mes es inferior en comparación al resto.

En definitiva, el presente trabajo proporciona un método para obtener asignaciones eficientes entre los usos in situ y usos extractivos para los meses que se presentan conflictos entre estos, bajo distintos escenarios hidrológicos. Asimismo, el costo de oportunidad asociado a estas asignaciones contribuye al avance en la cuantificación económica de los beneficios de los usos in situ a nivel mensual practicados en el cauce en estudio.

La principal limitación del presente trabajo consiste en no contar con información necesaria para poder asociar un valor económico a los beneficios cualitativos obtenidos para los usos recreativos. En consecuencia, no es posible determinar si los beneficios asociados a los usos in situ son comparables con los usos extractivos al no tener un orden de magnitud del beneficio económico del primero de estos. Por esta razón, es importante avanzar en la cuantificación de los beneficios de usos in situ en términos económicos.

BIBLIOGRAFÍA

AES Gener (2008). Descripción del Proyecto Alto Maipo. Obtenido de <http://seia.sea.gob.cl/>.

Arthington, Á. H., Naiman, R. J., McClain, M. E., & Nilsson, C. (2010). Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities. *Freshwater Biology*, 55(1), 1-16.

Cardwell, H., Jager, H. I., & Sale, M. J. (1996). Designing instream flows to satisfy fish and human water needs. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(5), 356-363.

CEA (2008). Estudio caudal ecológico PHAM. Obtenido de <http://seia.sea.gob.cl/>.

CEA (2013). Informe Técnico del Caudal Ecológico del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo. Obtenido de <http://seia.sea.gob.cl/>.

CONIC-BF (2008) Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo: Balance hídrico de la hoya del río Maipo. Obtenido de <http://seia.sea.gob.cl/>.

Colby, B. G. (1990). Enhancing instream flow benefits in an era of water marketing. *Water Resources Research*, 26(6), 1113-1120.

Daubert, J. T., & Young, R. A. (1981). Recreational demands for maintaining instream flows: a contingent valuation approach. *American journal of agricultural economics*, 63(4), 666-676.

DGA (2001). Catastro de usos públicos no extractivos del agua. Convenio DGA-Universidad Austral de Chile.1-63.

DGA (2010). Análisis de metodología y determinación de caudales de reserve turísticos.1-581.

DGA (2015). Derechos concedidos XIII Región. Obtenido de <http://www.dga.cl/>.

Endesa. (2011). Introducción al cálculo de caudal ecológico un análisis de tendencias actuales. 1-184.

Hyra, R. (1978). Methods of assessing instream flows for recreation. Government Reports, Announcements and Index, National Technical Information Service (NTIS), US Department of Commerce, 78(26).

Jowett, I. G. (1997). Instream flow methods: a comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13(2), 115-127.

Loomis, J. B. (1998). ESTIMATING THE PUBLIC'S VALUES FOR INSTREAM FLOW: ECONOMIC TECHNIQUES AND DOLLAR VALUES¹.

Mosley, M. P. (1983). Flow requirements for recreation and wildlife in New Zealand rivers—a review. *Journal of hydrology (NZ)*, 22(2), 152-174.

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 769-784.

Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., & Warner, A. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147-170.

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation biology*, 1163-1174.

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., & Braun, D. P. (1997). How much water does a river need?. *Freshwater biology*, 37(1), 231-249.

Robert A. Young. (2005). Determining the economic Value of water: concept and methods. *Resources for the future*. 1-357.

Shelby, B., Brown, T. C., & Taylor, J. G. (1992). *Streamflow and recreation*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.

Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10.

Ward, F. A. (1987). Economics of water allocation to instream uses in a fully appropriated river basin: evidence from a New Mexico Wild River. *Water resources research* 23(3), 381-392.

Whittaker, D., & Shelby, B. (2002). Evaluating instream flows for recreation: Applying the structural norm approach to biophysical conditions. *Leisure Sciences*, 24(3-4), 363-374.

Whittaker, D. and Shelby, B. 2013. Aesthetics and recreation issues at the Enloe Hydroelectric Project - Expert Witness Report for Pollution Control Hearings Board, State of Washington, PCHB No. 12-082. February.

ANEXOS

ANEXO A: EJEMPLO EJE HIDRÁULICO PARA UN PERFIL EN RÍO MAIPO

El presente anexo contiene un ejemplo del eje hidráulico para un perfil perteneciente al río Maipo desde desembocadura río Yeso hasta confluencia con río Colorado.

Reach	River station	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	W.P. Total (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
RIO MAIPO	9	1	2.86	1279.44	1279.82	18.07	1279.85	0.012270	0.74	3.84	18.04	0.51
RIO MAIPO	9	2	5.72	1279.44	1279.94	20.32	1279.98	0.012276	0.94	6.10	20.27	0.55
RIO MAIPO	9	3	8.59	1279.44	1280.06	29.80	1280.10	0.013169	0.97	8.89	29.72	0.56
RIO MAIPO	9	4	11.45	1279.44	1280.12	31.90	1280.17	0.013579	1.06	10.75	31.80	0.58
RIO MAIPO	9	5	14.31	1279.44	1280.17	33.43	1280.24	0.013749	1.15	12.48	33.32	0.60
RIO MAIPO	9	6	17.17	1279.44	1280.21	33.93	1280.29	0.013799	1.23	13.99	33.80	0.61
RIO MAIPO	9	7	20.03	1279.44	1280.25	34.12	1280.34	0.013973	1.31	15.32	33.98	0.62
RIO MAIPO	9	8	22.90	1279.44	1280.29	34.39	1280.39	0.014089	1.38	16.61	34.24	0.63
RIO MAIPO	9	9	25.76	1279.44	1280.33	34.86	1280.43	0.014275	1.44	17.85	34.69	0.64
RIO MAIPO	9	10	28.62	1279.44	1280.36	35.31	1280.48	0.014403	1.50	19.06	35.13	0.65
RIO MAIPO	9	11	31.48	1279.44	1280.40	35.75	1280.52	0.014455	1.55	20.26	35.56	0.66
RIO MAIPO	9	12	34.34	1279.44	1280.43	36.13	1280.56	0.014722	1.61	21.32	35.94	0.67
RIO MAIPO	9	13	37.21	1279.44	1280.46	36.52	1280.60	0.014848	1.66	22.41	36.32	0.67
RIO MAIPO	9	14	40.07	1279.44	1280.49	37.28	1280.63	0.015040	1.70	23.53	37.07	0.68
RIO MAIPO	9	15	42.93	1279.44	1280.53	40.87	1280.68	0.015149	1.69	25.39	40.65	0.68
RIO MAIPO	9	16	45.79	1279.44	1280.57	42.16	1280.72	0.015235	1.72	26.68	41.92	0.69
RIO MAIPO	9	17	48.65	1279.44	1280.59	42.24	1280.75	0.015299	1.76	27.65	41.99	0.69
RIO MAIPO	9	18	51.52	1279.44	1280.61	42.32	1280.78	0.015367	1.80	28.60	42.05	0.70
RIO MAIPO	9	19	54.38	1279.44	1280.63	42.40	1280.81	0.015410	1.84	29.54	42.12	0.70
RIO MAIPO	9	20	57.24	1279.44	1280.65	42.47	1280.83	0.015499	1.88	30.43	42.18	0.71
RIO MAIPO	9	21	62.96	1279.44	1280.70	42.62	1280.89	0.015569	1.95	32.23	42.30	0.71
RIO MAIPO	9	22	68.69	1279.44	1280.74	42.76	1280.95	0.015707	2.03	33.91	42.41	0.72
RIO MAIPO	9	23	74.41	1279.44	1280.78	42.90	1281.00	0.015726	2.09	35.61	42.52	0.73
RIO MAIPO	9	24	80.14	1279.44	1280.82	43.02	1281.05	0.015759	2.15	37.25	42.62	0.73
RIO MAIPO	9	25	85.86	1279.44	1280.85	43.13	1281.10	0.015827	2.21	38.81	42.70	0.74
RIO MAIPO	9	26	91.58	1279.44	1280.89	43.24	1281.15	0.015860	2.27	40.35	42.78	0.75
RIO MAIPO	9	27	97.31	1279.44	1280.92	43.34	1281.20	0.015932	2.33	41.83	42.85	0.75
RIO MAIPO	9	28	103.03	1279.44	1280.96	43.44	1281.25	0.015977	2.38	43.29	42.93	0.76
RIO MAIPO	9	29	108.76	1279.44	1280.99	43.53	1281.29	0.016111	2.44	44.65	42.99	0.76
RIO MAIPO	9	30	114.48	1279.44	1281.02	43.62	1281.34	0.016163	2.49	46.04	43.06	0.77
RIO MAIPO	9	31	120.20	1279.44	1281.05	43.71	1281.38	0.016245	2.54	47.37	43.13	0.77
RIO MAIPO	9	32	125.93	1279.44	1281.08	43.81	1281.42	0.016214	2.58	48.79	43.20	0.78
RIO MAIPO	9	33	131.65	1279.44	1281.11	43.90	1281.47	0.016324	2.63	50.04	43.26	0.78
RIO MAIPO	9	34	137.38	1279.44	1281.14	43.98	1281.51	0.016402	2.68	51.30	43.32	0.79
RIO MAIPO	9	35	143.10	1279.44	1281.17	44.07	1281.55	0.016379	2.72	52.64	43.39	0.79

Tabla A I: Eje Hidráulico perfil perteneciente a río Maipo

ANEXO B: COSTOS MARGINALES DE ENERGÍA EN BARRA A. JAHUEL A NIVEL HORARIO EN MESES DE OCTUBRE-ABRIL CDEC-SIC

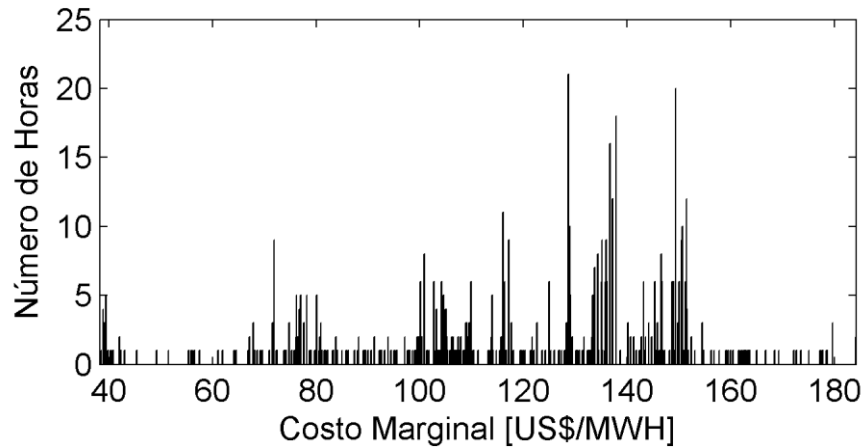


Figura B I: Frecuencia horaria de precios de energía en Barra A.Jahuel 220 durante enero del 2015

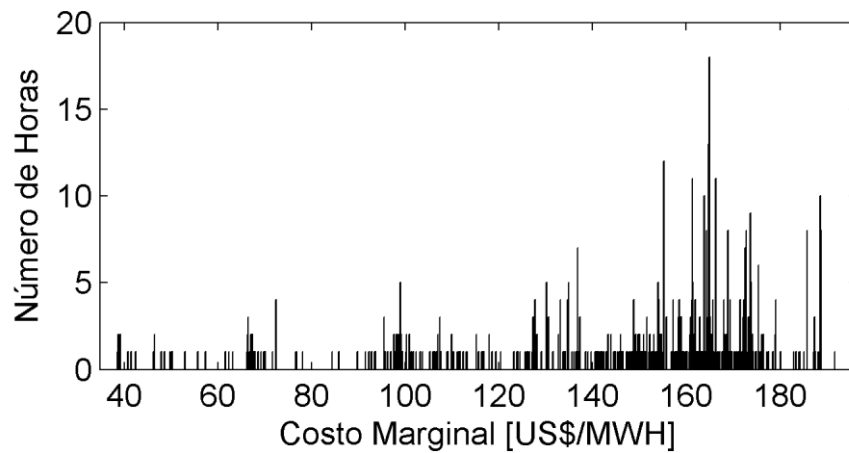


Figura B II: Frecuencia horaria de precios de energía en Barra A.Jahuel 220 durante febrero del 2015

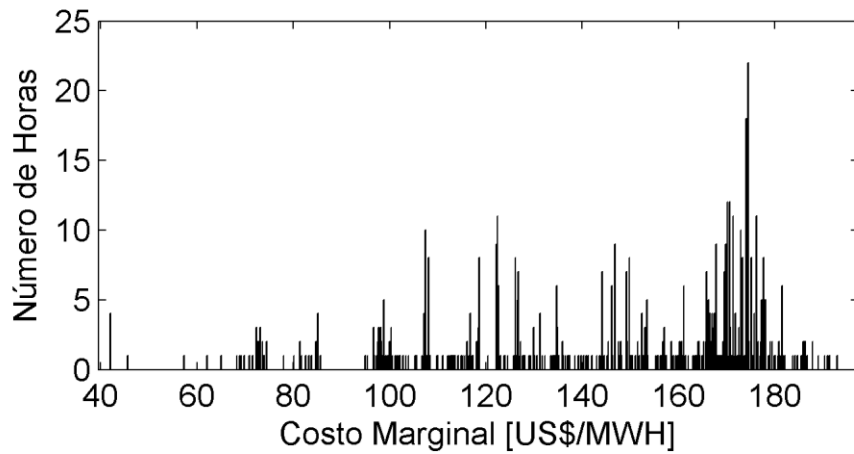


Figura B III: Frecuencia horaria de precios de energía en Barra A. Jahuel 220 durante marzo del 2015

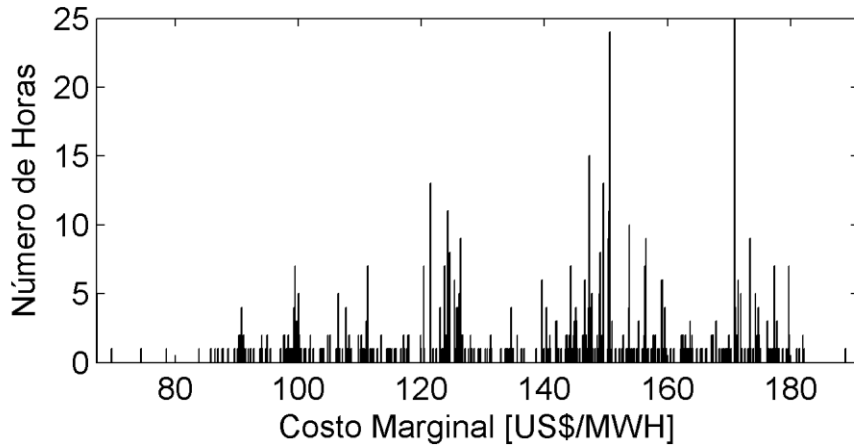


Figura B IV: Frecuencia horaria de precios de energía en Barra A. Jahuel 220 durante abril del 2015

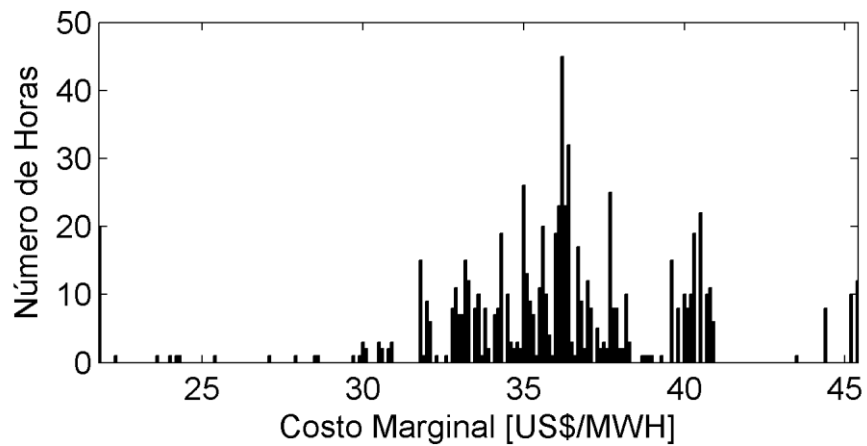


Figura B V: Frecuencia horaria de precios de energía en Barra A. Jahuel 220 durante octubre del 2015

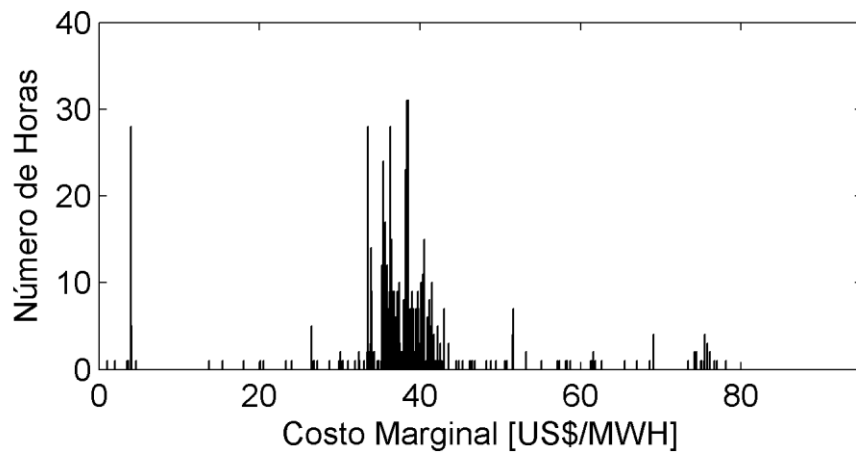


Figura B VI: Frecuencia horaria de precios de energía en Barra A.Jahuél 220 durante noviembre del 2015

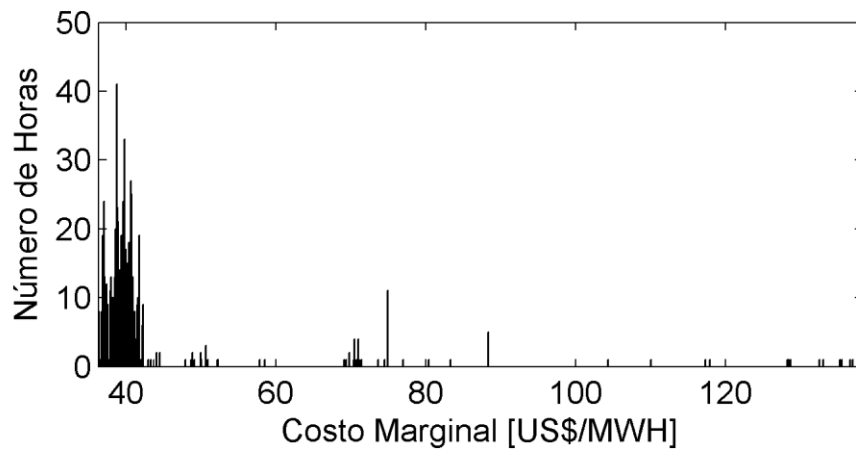


Figura B VII: Frecuencia horaria de precios de energía en Barra A.Jahuél 220 durante diciembre del 2015

ANEXO C: PRECIO ENERGÍA MENSUAL EN FUNCIÓN DEL CAUDAL MEDIO EXTRAIDO EN MESES DE VERANO

El presente anexo contiene los resultados mensuales de la curva de duración de precios $P(f)$, el precio energía $\bar{P}(f)$, ajuste precio energía $PE_m(f)$ en función de la frecuencia acumulada horaria f , para finalmente obtener el precio de energía en función del caudal medio mensual generado $PE_m(Q_m)$.

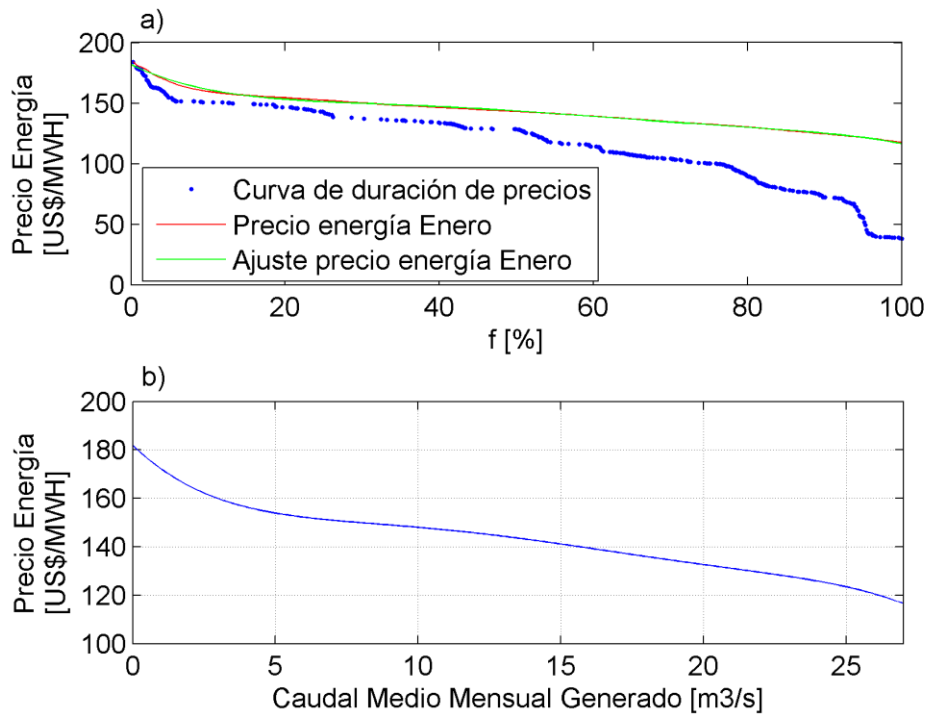


Figura C I: Mes de enero a) Curva de duración de precios, precio energía y ajuste precio energía. b) Precio de energía enero en función del caudal medio mensual generado.

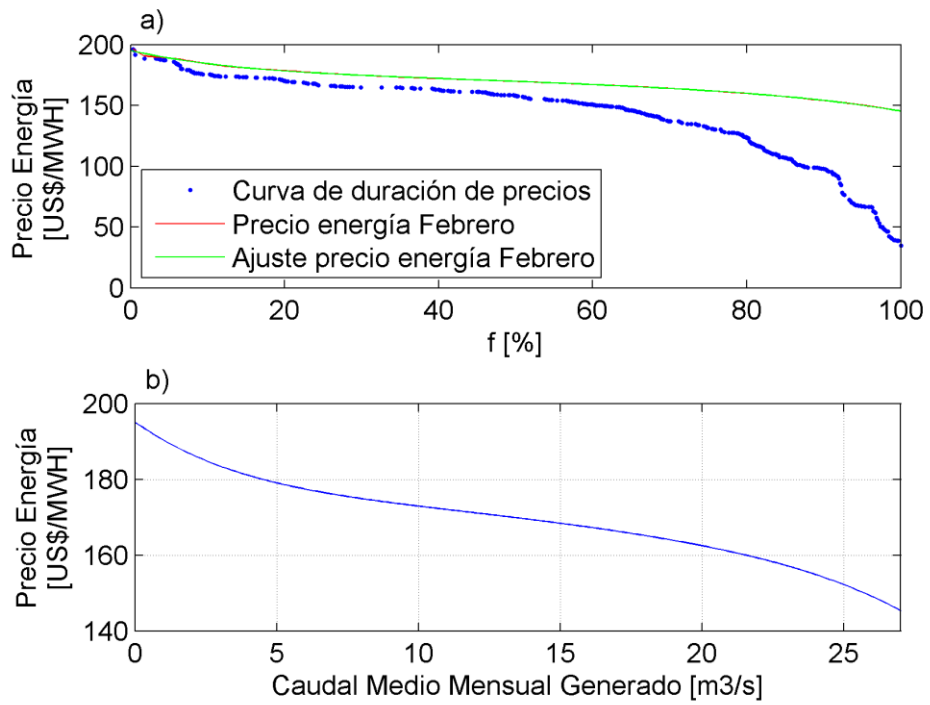


Figura C II: Mes de febrero a) Frecuencia acumulada precio energía. b) Precio de energía en función del caudal medio mensual generado.

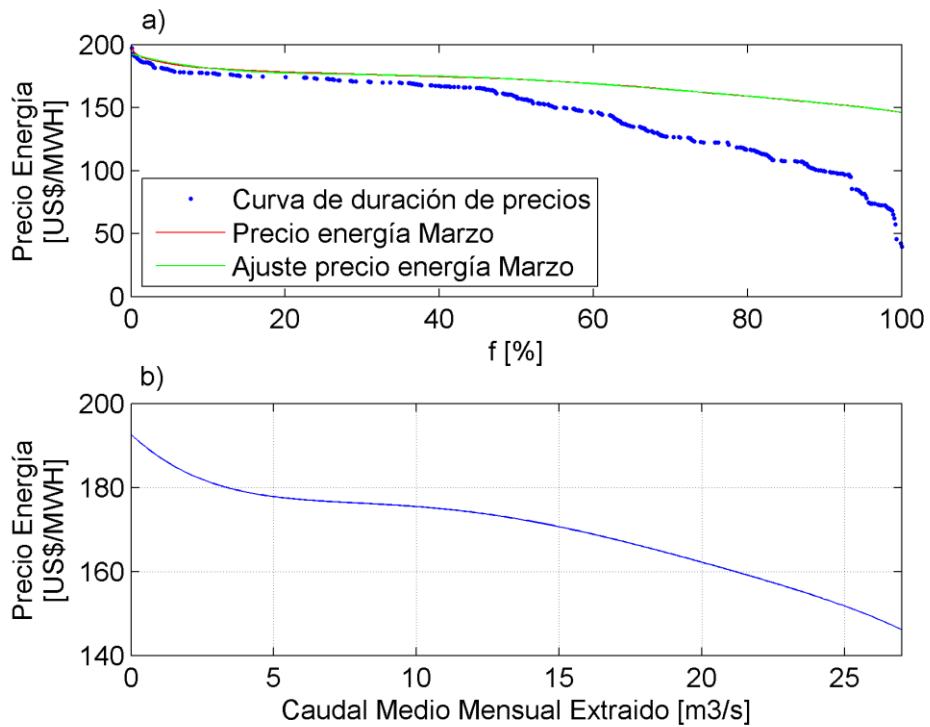


Figura C III: Mes de marzo a) Frecuencia acumulada precio energía. b) Precio de energía en función del caudal medio mensual generado.

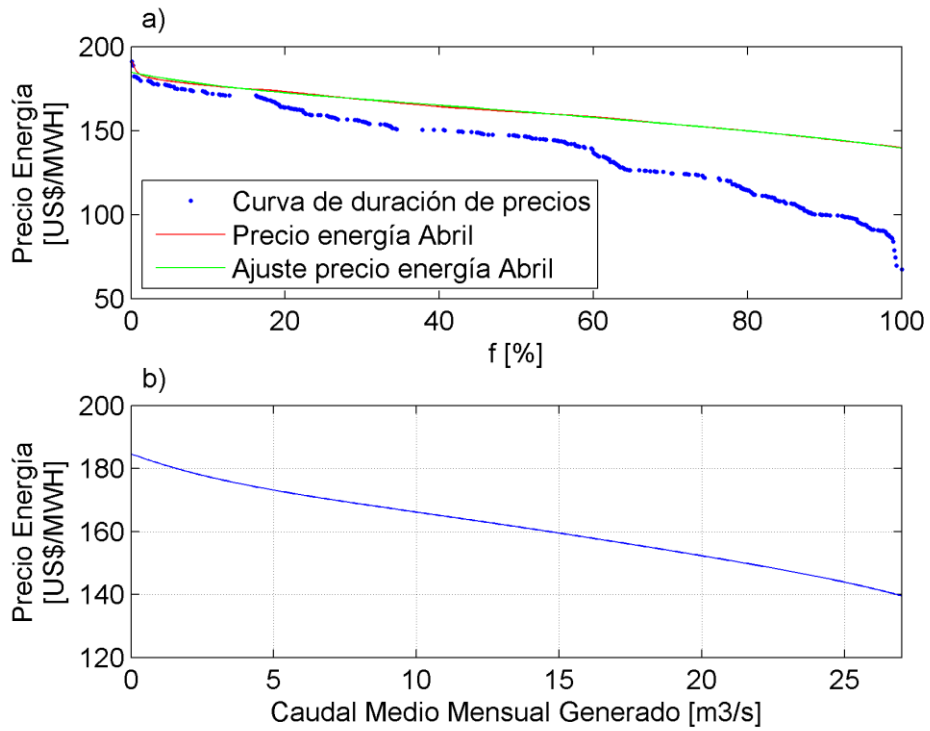


Figura C IV: Mes de abril a) Frecuencia acumulada precio energía. b) Precio de energía abril en función del caudal medio mensual generado.

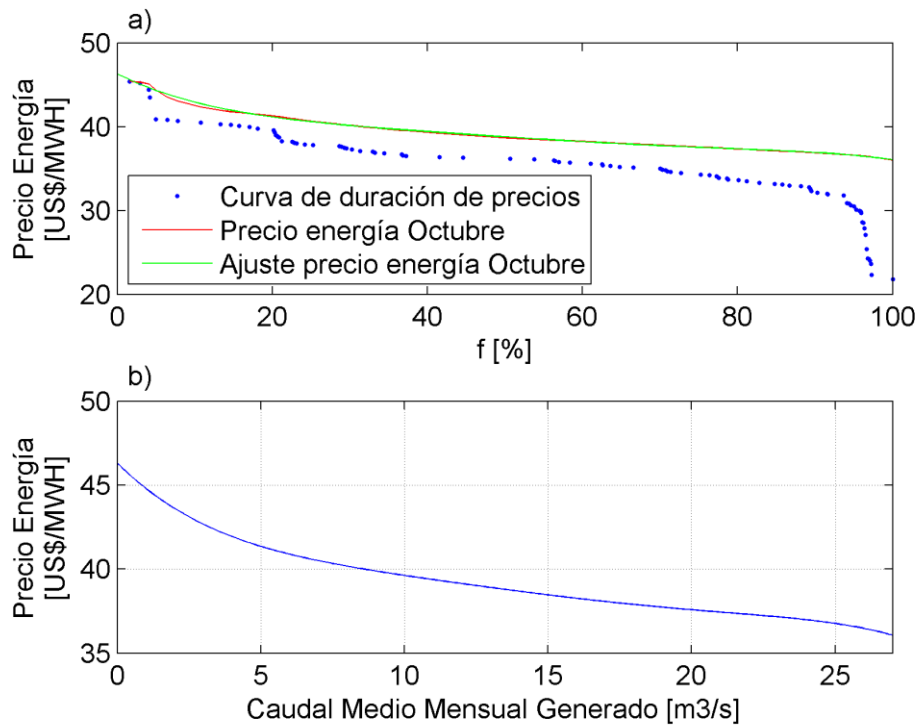


Figura C V: Mes de octubre a) Frecuencia acumulada precio energía. b) Precio de energía octubre en función del caudal medio mensual generado.

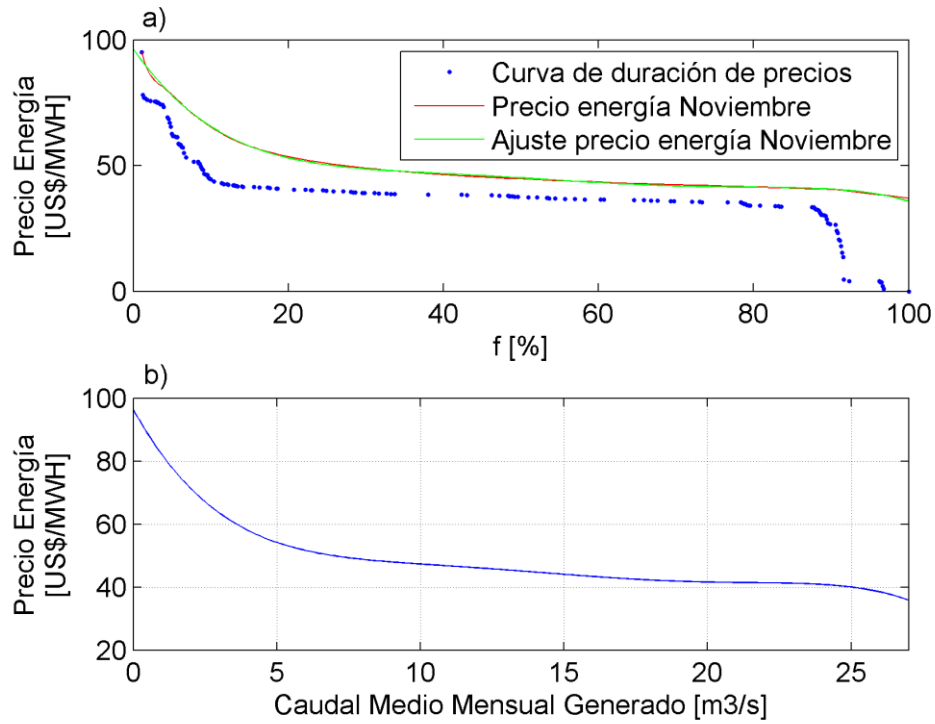


Figura C VI: Mes de noviembre a) Frecuencia acumulada precio energía. b) Precio de energía noviembre en función del caudal medio mensual generado.

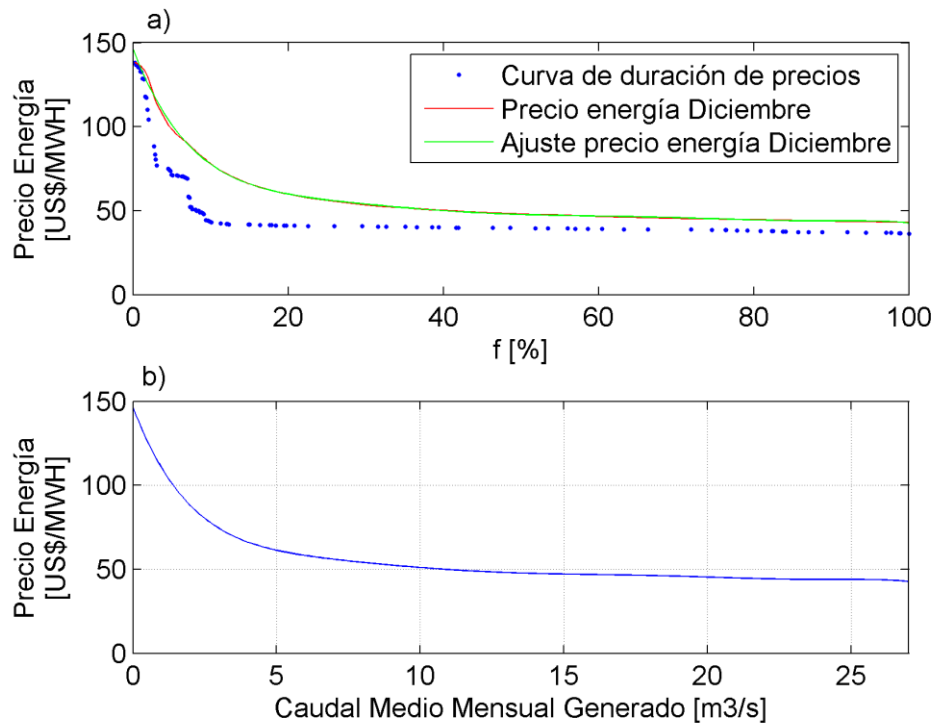


Figura C VII: Mes de diciembre a) Frecuencia acumulada precio energía. b) Precio de energía diciembre en función del caudal medio mensual generado.

ANEXO D: BENEFICIO ECONÓMICO Y MARGINAL MENSUAL DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ALTO MAIPO

El presente anexo contiene los resultados del beneficio económico y beneficio marginal del PHAM en función del caudal medio mensual generado para los meses de verano (octubre-abril).

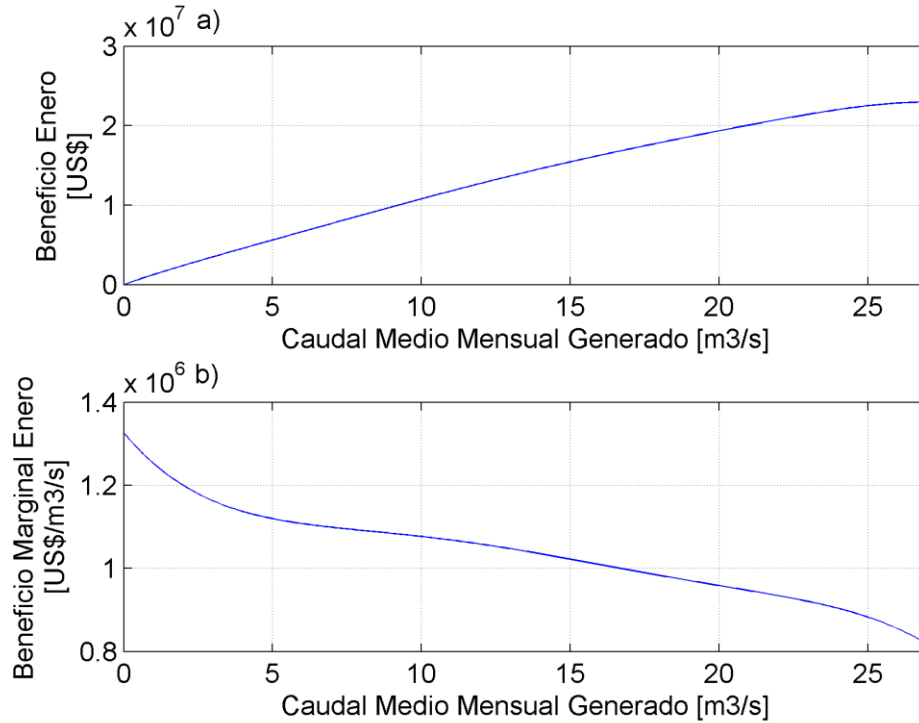


Figura D I: a) Beneficio económico en enero en función del caudal medio generado. b) Beneficio marginal en enero en función del caudal medio generado.

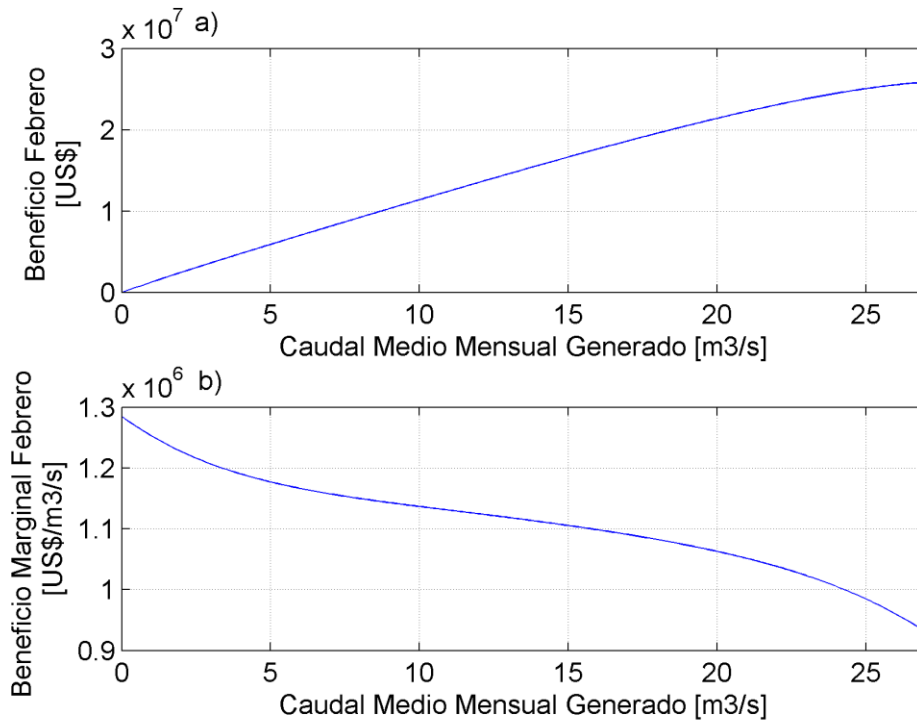


Figura D II: a) Beneficio económico en febrero en función del caudal medio generado. b) Beneficio marginal en febrero en función del caudal medio generado.

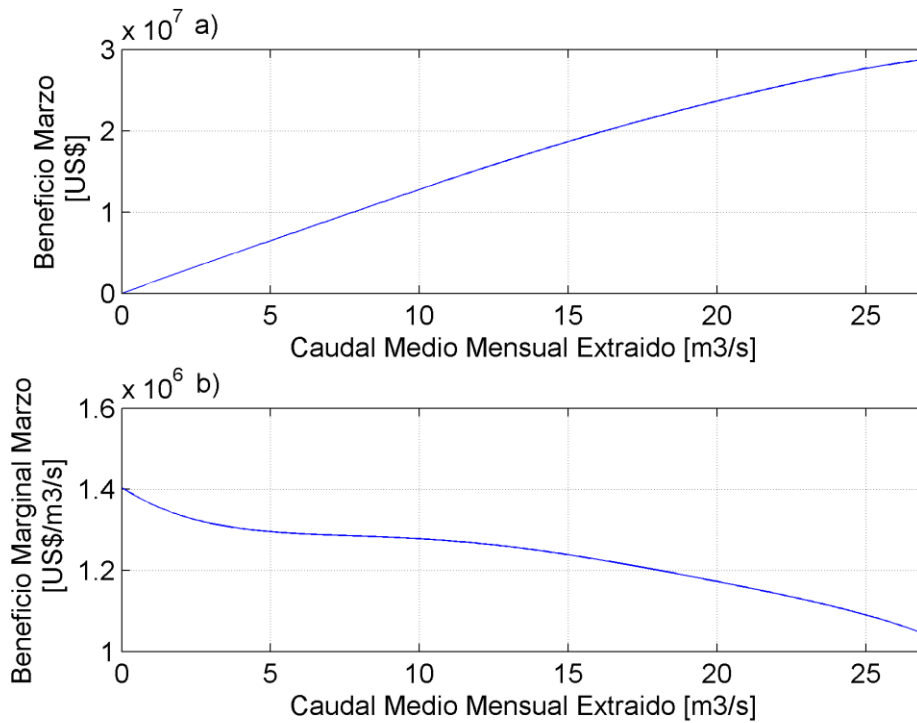


Figura D III: a) Beneficio económico en marzo en función del caudal medio generado. b) Beneficio marginal en marzo en función del caudal medio generado.

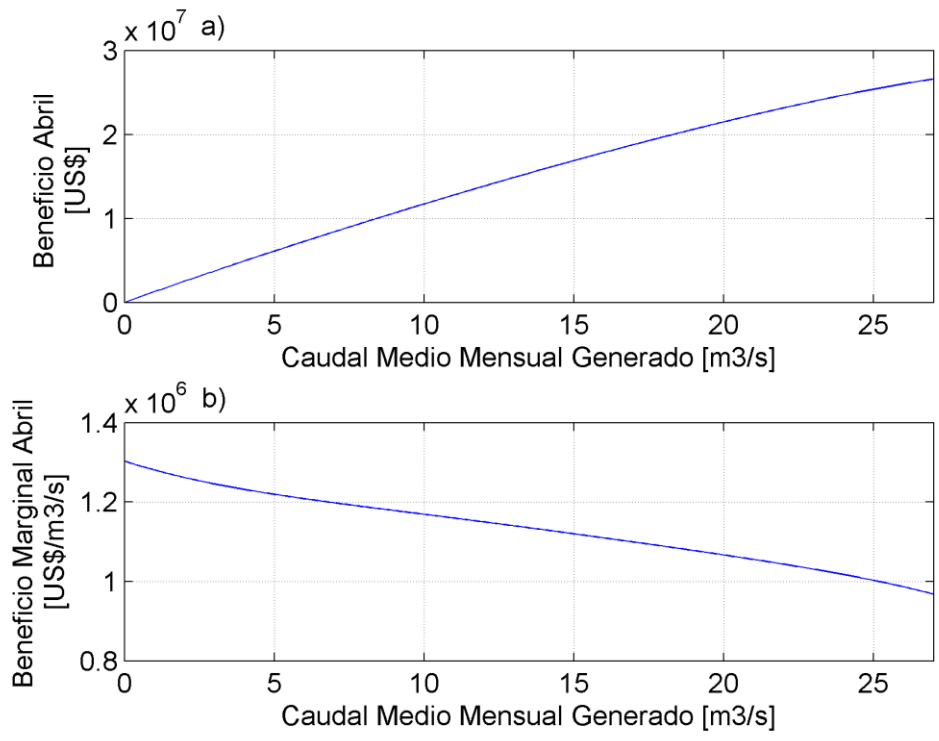


Figura D IV: a) Beneficio económico en abril en función del caudal medio generado. b) Beneficio marginal en abril en función del caudal medio generado.

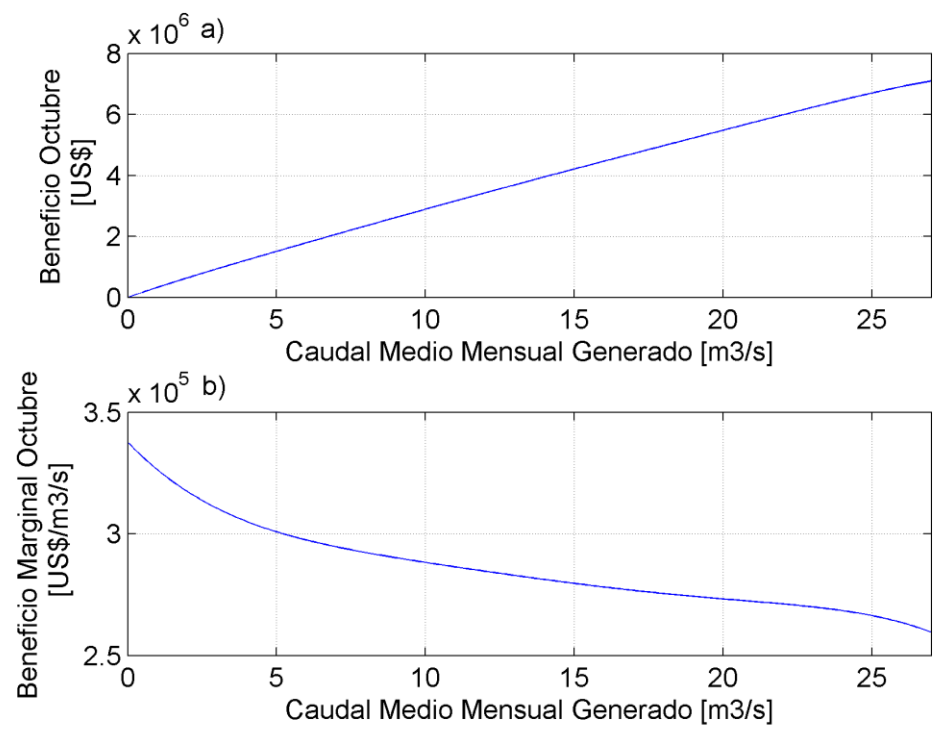


Figura D V: a) Beneficio económico en octubre en función del caudal medio generado. b) Beneficio marginal en octubre en función del caudal medio generado.

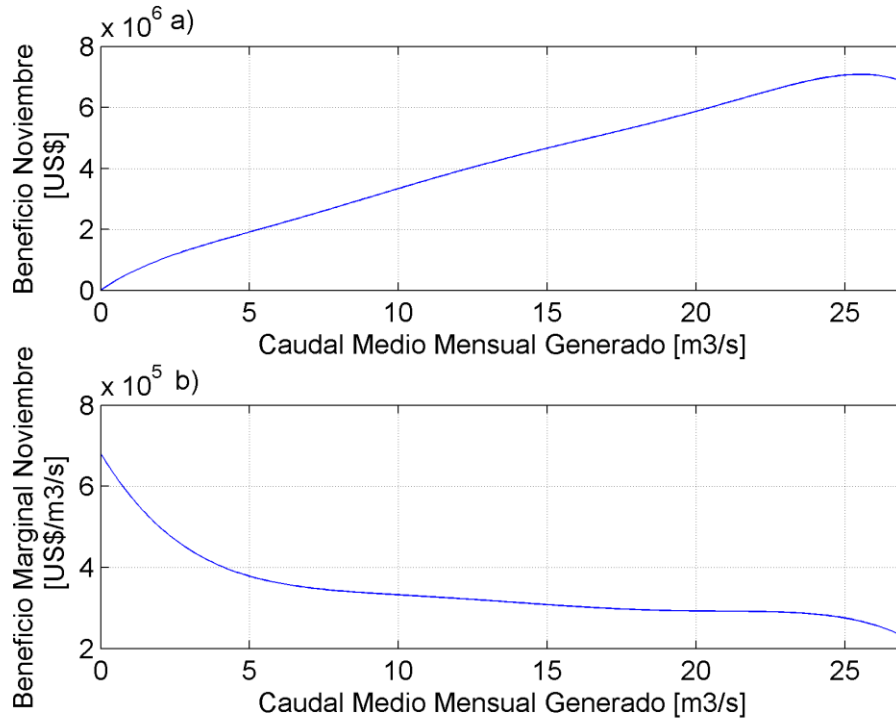


Figura D VI: a) Beneficio económico en noviembre en función del caudal medio generado. b) Beneficio marginal en noviembre en función del caudal medio generado.

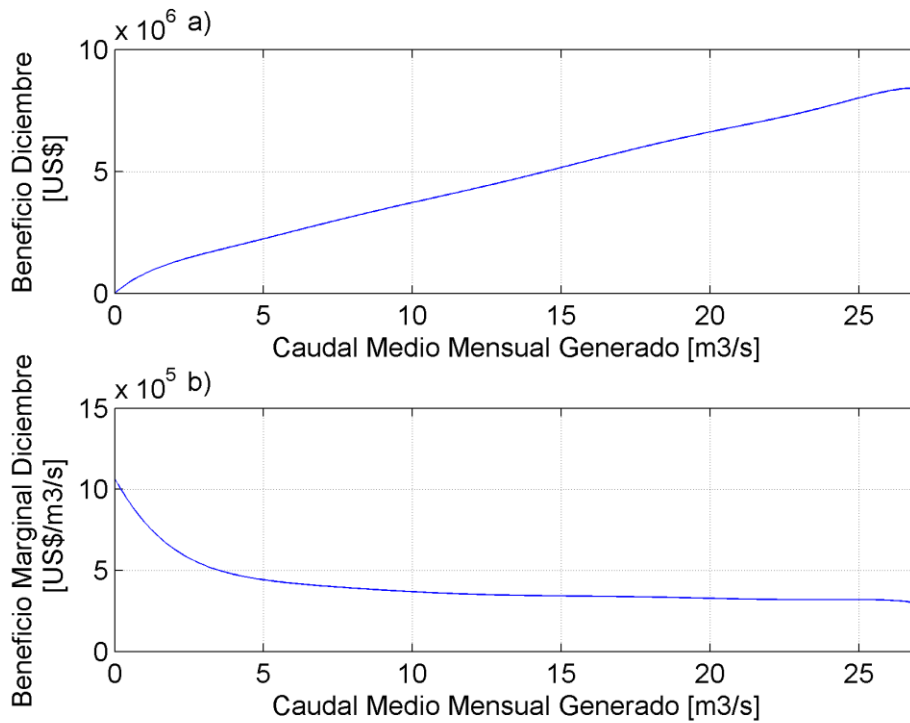


Figura D VII: a) Beneficio económico en diciembre en función del caudal medio generado. b) Beneficio marginal en diciembre en función del caudal medio generado.